

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

MODELADO MATEMÁTICO Y SIMULACIÓN DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR DE UN LECHO FIJO PARA EL NÚCLEO DEL REACTOR NUCLEAR “FIXED BED NUCLEAR REACTOR (FBNR)”

**TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL GRADO DE MAGÍSTER EN
INGENIERÍA MECÁNICA**

JUAN CARLOS ALMACHI NACIMBA

juanypichyforever@gmail.com

JESSICA ALEXANDRA MONTENEGRO VILLARREAL

jessyal@gmail.com

DIRECTOR: ING. ÁNGEL ADALBERTO PORTILLA AGUILAR, M.Sc.

angel.portilla@epn.edu.ec

CO-DIRECTOR: ING. WILLIAM RICARDO VENEGAS TORO, M.Sc.

william.venegas@epn.edu.ec

Quito, enero 2017

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por los señores: Almachi Nacimba Juan Carlos y Montenegro Villarreal Jessica Alexandra, bajo nuestra supervisión.

ING. PORTILLA AGUILAR ÁNGEL ADALBERTO M.Sc.
DIRECTOR DEL PROYECTO

ING. VENEGAS TORO WILLIAM RICARDO M.Sc.
CO-DIRECTOR DEL PROYECTO

DECLARACIÓN

Nosotros, Almachi Nacimba Juan Carlos y Montenegro Villarreal Jessica Alexandra, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

ALMACHI NACIMBA JUAN CARLOS

MONTENEGRO VILLARREAL JESSICA ALEXANDRA

DEDICATORIA

A mis amados padres; Pablo Almachi y Elsa Nacimba junto con mis sobrinitos, Samuelito y Carolina.

Juan Carlos.

A mi hija Isabella, a mis padres Enrique Montenegro y Narciza Villarreal

Jessica Alexandra.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por habernos dado la oportunidad de seguir existiendo para poder culminar este proyecto.

Al Ing. Ángel Portilla, por brindarnos su valiosa dirección en el proyecto, por el apoyo, tiempo y conocimiento aportado. Al Ing. William Venegas por su colaboración y ayuda incondicional.

A todas las personas que conforman el Laboratorio de Caracterización Térmica por su ayuda y aliento en los momentos difíciles, gracias, Cristian, David y Alvaro.

A los amigos más cercanos por su apoyo sincero.

Juan Carlos.

Jessica Alexandra.

CONTENIDO

Certificación	i
Declaración	ii
Dedicación	iii
Agradecimientos	iv
Resumen	xvii
Abstract	xviii
Presentación	xix
1. Revisión bibliográfica	1
1.1. Reactores nucleares de cuarta generación y reactor nuclear de lecho fijo FBNR	1
1.1.1. Desarrollo de la energía nuclear	1
1.1.2. Reactor Nuclear de Lecho Fijo FBNR	6
1.2. Termo hidráulica de los reactores de lecho fijo	9
1.2.1. Clasificación de los reactores de lecho fijo	9
1.2.2. Características de los lechos fijos empacados	10
1.2.3. Tipos de estructuras para un lecho fijo empacado	11
1.2.4. Análisis hidráulico de un fluido dentro de un lecho fijo	13
1.2.5. Transferencia de calor en un lecho fijo	17
1.3. Paquetes computacionales especializados en análisis termo hidráulico	18
1.3.1. Descripción de los Paquetes Computacionales para simulación	19
1.3.1. Análisis comparativo de paquetes computacionales	22
2. Simulación del lecho fijo y modelado matemático del reactor nuclear FBNR	24
2.1. Simulación del lecho fijo del reactor nuclear FBNR	24
2.1.1. Parámetros fundamentales para la creación del modelo de simulación	25
2.1.2. Propiedades, dimensiones y consideraciones del combustible nuclear	27
2.1.3. Arreglo del material nuclear	29
2.1.4. Condiciones iniciales para la simulación	30
2.1.5. Consideraciones para la simulación	30
2.1.6. Creación del modelo de simulación en 3D	31

2.1.7.	Resultados obtenidos de la simulación	31
2.1.8.	Resultados de simulación arreglo FCC, velocidad de fluido de 0.4 [m/s]	32
2.1.9.	Curvas de la simulación para FCC a diferentes velocidades del fluido: 0.4, 0.6, 0.8 y 1 [m/s]	33
2.1.10.	Curvas de la simulación para BCC a diferentes velocidades del fluido: 0.4, 0.6, 0.8 y 1 [m/s]	40
2.2.	Modelado matemático del lecho fijo del reactor nuclear FBNR	47
2.2.1.	Modelado de la transferencia de calor en el fluido refrigerante	47
2.2.2.	Modelo propuesto para la transferencia de calor en el fluido refrigerante	49
2.2.3.	Presentación de resultados para el fluido refrigerante, arreglo FCC	53
2.2.4.	Presentación de resultados para el fluido refrigerante, arreglo BCC	54
2.2.5.	Modelado de la transferencia de calor en el combustible nuclear	55
2.2.6.	Presentación de resultados para el combustible nuclear, Arreglo FCC, diferentes velocidades del fluido	68
2.2.7.	Presentación de resultados para el combustible nuclear, Arreglo BCC, diferentes velocidades del fluido	71
2.2.8.	Modelado de presiones en el lecho del reactor	73
2.2.9.	Presentación de resultados para el perfil de presiones, Arreglo FCC, diferentes Velocidades.....	75
2.2.10.	Presentación de resultados para el perfil de presiones, Arreglo BCC, diferentes Velocidades	76
3.	Resultados y discusión	77
3.1.	Análisis de los perfiles simulados y modelados de la temperatura del refrigerante, arreglo FCC	77
3.2.	Análisis de los perfiles simulados y modelados de la temperatura de la esfera de combustible, arreglo FCC	78
3.3.	Análisis de los perfiles simulados y modelados de la presión, arreglo FCC ..	80
3.4.	Análisis de los perfiles simulados y modelados de la temperatura del refrigerante, arreglo BCC	81
3.5.	Análisis de los perfiles simulados y modelados de la temperatura de la esfera de combustible, arreglo BCC	83
3.6.	Análisis de los perfiles simulados y modelados de la presión, arreglo BCC .	84
3.7.	Análisis de los porcentajes de error	86
3.7.1.	Errores obtenidos para arreglo FCC y BCC	86

3.8.	Gráficas de control de trabajo de las esferas	90
3.9.	Selección del arreglo y condiciones apropiadas para el funcionamiento del reactor	94
4.	Conclusiones y recomendaciones	96
4.1.	Conclusiones	96
4.2.	Recomendaciones	97
	Bibliografía	99
	Anexos	i

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Generaciones de Reactores Nucleares	2
Figura 1.2. Descripción gráfica del reactor FBNR	8
Figura 1.3. Descripción elemento combustible-material CERMET	8
Figura 1.4. Celda Unitaria configuración BCC	12
Figura 1.5. Celda Unitaria configuración FCC	13
Figura 1.6. Perfil de velocidad - Fluido a través de una esfera	14
Figura 1.7. Descripción de las etapas del modelado en CFD	19
Figura 1.8. Comparación de paquetes computacionales	23
Figura 2.1. Dimensiones del núcleo del reactor	25
Figura 2.2. Simulaciones previas	25
Figura 2.3. Nuevas dimensiones del núcleo del reactor	26
Figura 2.4. Esfera equivalente	29
Figura 2.5. Árbol de simulación	31
Figura 2.6. Temperatura	32
Figura 2.7. Presión	33
Figura 2.8. Velocidad	33
Figura 2.9. Perfil de temperatura del fluido simulado, arreglo FCC, velocidad 0.4 [m/s]	34
Figura 2.10. Perfil de temperatura de las esferas simulado, arreglo FCC, velocidad 0.4 [m/s]	35
Figura 2.11. Perfil de presiones simulado, arreglo FCC, velocidad 0.4 [m/s]	35
Figura 2.12. Perfil de temperatura del fluido simulado, arreglo FCC, velocidad 0.6 [m/s]	36
Figura 2.13. Perfil de temperatura de las esferas simulado, arreglo FCC, velocidad 0.6 [m/s]	36
Figura 2.14. Perfil de presiones simulado, arreglo FCC, velocidad 0.6 [m/s]	37
Figura 2.15. Perfil de temperatura del fluido simulado, arreglo FCC, velocidad 0.8 [m/s]	37
Figura 2.16. Perfil de temperatura de las esferas simulado, arreglo FCC, velocidad 0.8 [m/s]	38
Figura 2.17. Perfil de presiones simulado, arreglo FCC, velocidad 0.8 [m/s]	38

Figura 2.18. Perfil de temperatura del fluido simulado, arreglo FCC, velocidad 1 [m/s]	39
Figura 2.19. Perfil de temperatura de las esferas simulado, arreglo FCC, velocidad 1 [m/s]	39
Figura 2.20. Perfil de presiones simulado, arreglo FCC, velocidad 1 [m/s]	40
Figura 2.21. Perfil de temperatura del fluido simulado, arreglo BCC, velocidad 0.4 [m/s]	41
Figura 2.22. Perfil de temperatura de las esferas simulado, arreglo BCC, velocidad 0.4 [m/s]	41
Figura 2.23. Perfil de presiones simulado, arreglo BCC, velocidad 0.4 [m/s]	42
Figura 2.24. Perfil de temperatura del fluido simulado, arreglo BCC, velocidad 0.6 [m/s]	42
Figura 2.25. Perfil de temperatura de las esferas simulado, arreglo BCC, velocidad 0.6 [m/s]	43
Figura 2.26. Perfil de presiones simulado, arreglo BCC, velocidad 0.6 [m/s]	43
Figura 2.27. Perfil de temperatura del fluido simulado, arreglo BCC, velocidad 0.8 [m/s]	44
Figura 2.28. Perfil de temperatura de las esferas simulado, arreglo BCC, velocidad 0.8 [m/s]	44
Figura 2.29. Perfil de presiones simulado, arreglo BCC, velocidad 0.8 [m/s]	45
Figura 2.30. Perfil de temperatura del fluido simulado, arreglo BCC, velocidad 1 [m/s]	45
Figura 2.31. Perfil de temperatura de las esferas simulado, arreglo BCC, velocidad 1 [m/s]	46
Figura 2.32. Perfil de presiones simulado, arreglo BCC, velocidad 1 [m/s]	46
Figura 2.33. Esquema transferencia de calor en el fluido refrigerante	47
Figura 2.34. Esquema balance de energía del fluido refrigerante	49
Figura 2.35. Representación área intersticial	51
Figura 2.36. Perfil de temperatura del fluido, arreglo FCC, varias velocidades del fluido	54
Figura 2.37. Perfil de temperatura del fluido, arreglo BCC, varias velocidades del fluido	54
Figura 2.38. Mecanismos de transferencia de calor esfera combustible	55
Figura 2.39. Consideración placa plana	56
Figura 2.40. Consideración placa plana e identificación de temperaturas de fluido	56
Figura 2.41. Balance de energía en las superficies	57

Figura 2.42. Condiciones de frontera	58
Figura 2.43. Temperatura de pared en la esfera combustible	64
Figura 2.44. Temperatura de pared tramo derecho	66
Figura 2.45. Temperatura de pared tramo izquierdo	67
Figura 2.46. Perfil de temperatura de las esferas, Velocidad 0.4 [m/s]	69
Figura 2.47. Perfil de temperatura de las esferas, Velocidad 0.6 [m/s]	69
Figura 2.48. Perfil de temperatura de las esferas, Velocidad 0.8 [m/s]	70
Figura 2.49. Perfil de temperatura de las esferas, Velocidad 1 [m/s]	70
Figura 2.50. Perfil de temperatura de las esferas, Velocidad 0.4 [m/s]	71
Figura 2.51. Perfil de temperatura de las esferas, Velocidad 0.6 [m/s]	71
Figura 2.52. Perfil de temperatura de las esferas, Velocidad 0.8 [m/s]	72
Figura 2.53. Perfil de temperatura de las esferas, Velocidad 1 [m/s]	72
Figura 2.54. Perfil de presiones, arreglo FCC, varias velocidades del fluido	75
Figura 2.55. Perfil de presiones, arreglo BCC, varias velocidades del fluido	76
Figura 3.1. Perfil de temperatura datos simulados y modelados arreglo, FCC	78
Figura 3.2. Perfil de temperatura de las esferas a diferentes velocidades, arreglo FCC	79
Figura 3.3. Perfil de presiones, arreglo FCC	80
Figura 3.4. Perfil de temperatura datos simulados y modelados arreglo, BCC	82
Figura 3.5. Perfil de temperatura de las esferas a diferentes velocidades, arreglo BCC	83
Figura 3.6. Perfil de presiones, arreglo BCC	84
Figura 3.7. Diagrama de caja y bigotes temperatura del fluido, arreglo FCC	87
Figura 3.8. Diagrama de caja y bigotes temperatura del fluido, arreglo BCC	87
Figura 3.9. Diagrama de caja y bigotes temperatura de la esfera combustible, arreglo FCC	88
Figura 3.10. Diagrama de caja y bigotes temperatura de la esfera combustible, arreglo BCC	88
Figura 3.11. Diagrama de caja y bigotes de la presión, arreglo FCC	89
Figura 3.12. Diagrama de caja y bigotes de la presión, arreglo BCC	90
Figura 3.13. Gráfica de control, arreglo FCC	92
Figura 3.14. Gráfica de control, arreglo BCC	93
Figura 3.15. Selección del arreglo	94

Figura A.1. Uso del asistente de modelo .mph.	iii
Figura A.2. Selección del estudio multi físico	iii
Figura A.3. Parámetros geométricos	iv
Figura A.4. Selección y creación de las propiedades de los materiales	v
Figura A.5. Introducción de condiciones de borde, velocidad del fluido	v
Figura A.6. Introducción de condiciones de borde, generación de calor	vi
Figura A.7. Mallado del lecho	vi
Figura A.8. Representación de la transferencia de calor	vii
Figura A.9. Obtención de resultados	vii
Figura B.1. Creación de línea de extracción de datos	viii
Figura B.2. Exportación de datos	ix
Figura B.3. Creación de la base de datos	x
Figura B.4. Base de datos ordenada	x
Figura C.1. Temperatura, arreglo FCC, velocidad 0.6 [m/s]	xi
Figura C.2. Presión, arreglo FCC, velocidad 0.6 [m/s]	xii
Figura C.3. Arreglo FCC, velocidad 0.6 [m/s]	xii
Figura C.4. Temperatura, arreglo FCC, velocidad 0.8 [m/s]	xiii
Figura C.5. Presión, arreglo FCC, velocidad 0.8 [m/s]	xiii
Figura C.6. Arreglo FCC, velocidad 0.8 [m/s]	xiii
Figura C.7. Temperatura, arreglo FCC, velocidad 1 [m/s]	xiv
Figura C.8. Presión, arreglo FCC, velocidad 1 [m/s]	xiv
Figura C.9. Arreglo FCC, velocidad 1 [m/s]	xv
Figura D.1. Ordenamiento de datos con Excel	xvi
Figura D.2. Introducción de datos en R	xvii
Figura E.1. Temperatura, arreglo BCC, velocidad 0.4 [m/s]	li
Figura E.2. Presión, arreglo BCC, velocidad 0.4 [m/s]	lii
Figura E.3. Arreglo BCC, velocidad 0.4 [m/s]	lii
Figura E.4. Temperatura, arreglo BCC, velocidad 0.6 [m/s]	liii
Figura E.5. Presión, arreglo BCC, velocidad 0.6 [m/s]	liii
Figura E.6. Arreglo BCC, velocidad 0.6 [m/s]	liii
Figura E.7. Temperatura, arreglo BCC, velocidad 0.8 [m/s]	liv
Figura E.8. Presión, arreglo BCC, velocidad 0.8 [m/s]	liv

Figura E.9. Arreglo BCC, velocidad 0.8 [m/s]	lv
Figura E.10. Temperatura, arreglo BCC, velocidad 1 [m/s]	lv
Figura E.11. Presión, arreglo BCC, velocidad 1 [m/s]	lvi
Figura E.12. Arreglo BCC, velocidad 1 [m/s]	lvi

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Evolución de centrales nucleares en el mundo	4
Tabla 1.2. Propiedades térmicas del CERMET	9
Tabla 1.3. Números de Reynolds de partícula y tipos de régimen	15
Tabla 1.4. Números de Reynolds modificado y tipos de régimen	15
Tabla 1.5. Tabla de calificaciones	22
Tabla 2.1. Importación de Datos	26
Tabla 2.2. Propiedades del combustible nuclear	27
Tabla 2.3. Propiedades de la esfera equivalente	29
Tabla 2.4. Condiciones iniciales para diferentes velocidades del fluido	30
Tabla 2.5. Características técnicas de la simulación, FCC 0.4 [m/s]	32
Tabla 2.6. Valores de porosidad	48
Tabla 2.7. Propiedades termo físicas del agua	48
Tabla 2.8. Temperatura de salida fluido refrigerante	53
Tabla 2.9. Perfil de temperatura de la esfera combustible	68
Tabla 2.10. Presión de salida	74
Tabla 3.1. Caída de Presión	85
Tabla 3.2. Condiciones de funcionamiento del reactor	95
Tabla C.1. Características técnicas de la simulación, FCC 0.6 [m/s]	xi
Tabla C.2. Características técnicas de la simulación, FCC 0.8 [m/s]	xii
Tabla C.3. Características técnicas de la simulación, FCC 1 [m/s]	xiv
Tabla D.1. Base de datos simulada, perfil de temperatura del fluido para arreglo FCC, diferentes velocidades	xvii
Tabla D.2. Base de datos simulada, perfil de temperatura de las esferas para arreglo FCC, diferentes velocidades	xxiii
Tabla D.3. Base de datos simulada, perfil de presiones para arreglo FCC, diferentes velocidades	xxviii
Tabla D.4. Base de datos simulada, perfil de temperatura del fluido para arreglo BCC, diferentes velocidades	xxxiv
Tabla D.5. Base de datos simulada, perfil de temperatura de las esferas para arreglo BCC, diferentes velocidades	xxxix

Tabla D.6. Base de datos simulada, perfil de presiones para arreglo BCC, diferentes velocidades	xlv
Tabla E.1. Características técnicas de la simulación, BCC 0.4 [m/s]	li
Tabla E.2. Características técnicas de la simulación, BCC 0.6 [m/s]	lii
Tabla E.3. Características técnicas de la simulación, BCC 0.8 [m/s]	liv
Tabla E.4. Características técnicas de la simulación, BCC 1 [m/s]	lv
Tabla F.1. Base de datos modelo matemático del perfil de temperatura del fluido .	lvii
Tabla G.1. Propiedades termofísicas del fluido	lxiii
Tabla H.1. Base de datos calculada perfil de presiones	lxiv

SIMBOLOGÍA

ε	Porosidad
ρ	Densidad [$\frac{kg}{m^3}$]
μ	Viscosidad del fluido [$Pa.s$]
ΔP	Caída de presión [Pa]
ΔT_f	Variación de la temperatura del fluido refrigerante [$^{\circ}K$]
A_i	Área intersticial del lecho [m^2]
A_t	Área total del lecho [m^2]
BCC	Estructura centrada en el cuerpo
$C_{p f}$	Calor específico del fluido [$\frac{J}{^{\circ}K kg}$]
d_p	Diámetro de partícula [m]
d_h	Diámetro hidráulico [m]
D	Diámetro interno de conducción [m]
FCC	Estructura centrada en las caras
f_r	Factor de fricción
h	Coefficiente de convección [$\frac{W}{^{\circ}K m^2}$]
k_f	Conductividad térmica del fluido [$\frac{W}{^{\circ}K m}$]
k_s	Conductividad térmica del sólido [$\frac{W}{^{\circ}K m}$]
\dot{m}_f	Flujo másico del fluido [$\frac{kg}{s}$]
Nu	Número de Nusselt
n	Número de esferas
Re_{dp}	Número de Reynolds de partícula
Re_m	Número de Reynolds modificado
P_{eq}	Potencia equivalente [W]
P_r	Potencia Real [W]
P_{eqL}	Potencia equivalente del lecho [W]
Pr	Número de Prandtl
Q'''	Generación volumétrica de calor [$\frac{W}{m^3}$]
q'''	Generación volumétrica de calor por esfera [$\frac{W}{m^3}$]
r_l	Radio radio mínimo del lecho [m]
r_{eq}	Radio equivalente [m]

r_r	Radio real de la esfera [m]
S	Área superficial específica [m ²]
T_{fs}	Temperatura de salida del fluido refrigerante [°K]
T_{fe}	Temperatura de entrada del fluido refrigerante [°K]
T_w	Temperatura de pared sección de esfera combustible [°K]
V_s	Velocidad Superficial [$\frac{m}{s}$]
V_e	Volumen del espacio libre en el lecho [m ³]
V_s	Volumen del sólido [m ³]
V_s	Volumen del sólido [m ³]
V_t	Volumen total del lecho [m ³]
V_t	Volumen total del lecho [m ³]
V_{Eq}	Volumen de la esfera equivalente [m ³]
V_{Er}	Volumen de la esfera real [m ³]

RESUMEN

Un reactor nuclear tiene como finalidad generar energía térmica, a partir del uso de un medio refrigerante circulando por el combustible nuclear que tiene generación interna de calor; para mejorar la eficiencia de la transferencia de calor en el núcleo del reactor se considera como alternativa los lechos fijos formados por esferas combustibles, debido a su gran área superficial de transferencia. El reactor FBNR constituye una propuesta innovadora que fundamenta su funcionamiento en este tipo de estructura. Dentro del estudio de los lechos fijos es de relevancia definir parámetros técnicos importantes como el flujo mínimo de refrigerante, la configuración de los elementos combustibles que constituyen el lecho, el perfil de presión en el lecho, el perfil de temperatura del fluido refrigerante y el perfil de temperatura de la esfera combustible, los parámetros mencionados son de relevante importancia para asegurar que las limitaciones térmicas de los materiales involucrados en el núcleo y combustible no sean superadas. Con el fin de determinar los parámetros requeridos para un estado estacionario, se desarrolló un modelo 3D CAD que posteriormente fue examinado con el software Comsol Multiphysics, utilizando los módulos de *Heat Transfer* y *Conjugated Heat Transfer and Flow*, se estableció el modelo matemático de la transferencia de calor, el cual se basó en un balance de energía en el lecho al considerar a las esferas combustibles como fuente de generación de energía. Se obtuvo a la estructura BCC como mejor configuración del lecho, ya que bajo esta, existen condiciones seguras de operación, la velocidad óptima de circulación del refrigerante fue $0.6 [m/s]$, su selección se la realizó basándose en el análisis comparativo de parámetros y debido a la facilidad de construcción.

Palabras Clave: Lecho Fijo, Transferencia de Calor, Reactor FBNR, Simulación.

ABSTRACT

A nuclear reactor has the purpose of generating thermal energy, with the use of a cooling medium which may be ordinary water. To improve the heat transfer efficiency in the reactor core is considered as a better alternative to fixed beds, over a large area. The FBNR reactor constitutes an innovative reactor that bases its operation on this type of structure. Within the study of fixed beds it is important to define the minimum refrigerant flow, the configuration of the fuel elements that make up the bed, the pressure profile in the bed, the profile of the temperature of the coolant and the fuel elements, the parameters. It is of relevant importance to ensure that the thermal limitations of the materials involved in the core and fuel are not exceeded. In order to determine the parameters required for a steady state, a computational bed model was developed in the Comsol Multiphysics software, and Heat combined heat transfer and flow and transfer modules were used. The results of the simulation were validated using a comparison with the data of the theoretical model of heat transfer, which is based on a balance of energy in the bed when considering the fuel spheres as a source of energy generation. A BCC structure was obtained as the best bed configuration, since under this safe operating conditions the optimum refrigerant flow velocity was 0.6 m/s. The selection was made based on the comparative analysis of parameters and due to the ease of construction.

Keywords: Fixed bed, heat transfer, FBNR reactor, simulation.

PRESENTACIÓN

Desde el año 2000 hasta la actualidad para potencializar la inclusión de la energía nuclear dentro de la matriz energética mundial, se desarrollan nuevos conceptos de reactores nucleares conocidos como reactores de cuarta generación, los cuales están encaminados al fomento de innovaciones que permitan mejorar la eficiencia de la transferencia de calor en el núcleo en comparación con los reactores de generaciones anteriores, entre las alternativas propuestas se encuentran los reactores de lechos fijos, cuya característica más importante es su gran área superficial de transferencia de calor. En este tipo de reactores se fundamenta la propuesta del investigador Farhang Sefidvash con el reactor nuclear de lecho fijo FBNR, el aporte investigativo que se pretende realizar se enfoca en el estudio de la transferencia de calor en el núcleo del reactor debido a que es un tópico que no está completamente desarrollado en el reactor FBNR, para ello se obtendrán mediante simulación en el Software COMSOL y modelado matemático, los perfiles de temperatura del fluido refrigerante y de las esferas combustibles que constituyen el lecho, además de analizar el aspecto de caída de presión en el lecho para configuraciones del lecho del tipo centrado en las caras (FCC) y centrado en el cuerpo (BCC) y mediante el análisis comparativo de los parámetros termo hidráulicos determinar las condiciones de operación del reactor.

El presente proyecto de titulación consta de cuatro capítulos, cuyos contenidos se describen a continuación:

En el Capítulo 1 se detalla el desarrollo de la energía nuclear, su evolución tecnológica y la descripción de los componentes y funcionamiento del reactor nuclear de lecho fijo (FBNR), además de una revisión general de los factores de relevancia en el estudio termo hidráulico de este tipo de reactores, como mecanismos de transferencia de calor y caída de presión.

En el Capítulo 2 se detallan los pasos seguidos para la simulación del lecho fijo del reactor en el programa COMSOL MULTIPHYSICS y se establecen los parámetros para la creación del modelo de simulación, además se detalla la obtención de las ecuaciones que describen el comportamiento térmico del fluido refrigerante, de las esferas combustibles y de la caída

de presión en el lecho en estado estable.

En el Capítulo 3 se analiza y se validan los modelos matemáticos propuestos en base al porcentaje de error determinado, al comparar los resultados del modelo matemático con los obtenidos en la simulación. Se establecen mediante parámetros estadísticos las gráficas de control de temperatura de trabajo de las esferas y se estipulan las condiciones de funcionamiento del reactor mediante un análisis comparativo.

En el Capítulo 4 se presentan las conclusiones y recomendaciones relevantes obtenidas de la simulación y el modelamiento en estado estable de la transferencia de calor y caída de presión en el lecho fijo del núcleo del reactor FBNR.

1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En este capítulo se hablará del desarrollo de la energía nuclear, su evolución tecnológica, los programas que auspician el desarrollo de reactores nucleares de cuarta generación y la descripción de los componentes y funcionamiento del reactor nuclear de lecho fijo (FBNR).

Además se revisarán los parámetros característicos de un reactor de lecho fijo, los tipos de estructuras características y la termo-hidráulica de este tipo de reactores, en lo que respecta a los mecanismos de transferencia de calor presentes y la caída de presión. Como parte final del capítulo se presentarán a los paquetes computacionales especializados en análisis termo hidráulico que pueden ser útiles para realizar el estudio de la transferencia de calor en el núcleo del reactor FBNR.

1.1. Reactores nucleares de cuarta generación y reactor nuclear de lecho fijo FBNR

1.1.1. Desarrollo de la energía nuclear

A partir del año 1970 debido a la subida creciente del precio del petróleo y las difíciles relaciones laborales en los yacimientos de carbón, la energía nuclear comienza a formar parte de la matriz energética mundial ya que se empieza a comercializar reactores nucleares para la generación de electricidad mediante la construcción de centrales nucleares; en ese año la participación de la energía nuclear en la generación de electricidad fue del 3% , mientras que para el año 2015 el porcentaje de aporte a la demanda de electricidad mundial llegó al 15% (IEA., 2015a), evidenciándose así su considerable desarrollo.

Pero este desarrollo no ha sido marcado por un crecimiento lineal, este se ha visto afectado por lamentables accidentes como el de Three Mile Island (1979) y Chernóbil (1986) que marcaron una recesión en la construcción de centrales nucleares a nivel mundial, a partir del año de 1990 la tendencia en construcción de centrales nucleares se caracteriza por un crecimiento lento y no homogéneo en todo el mundo, China encabezó la lista de países con centrales nucleares en construcción con un total de 9, Rusia con 7 y Corea del Sur con

6 (Coppari N., 2011). Para el año de 2011 en Japón se produjo el lamentable accidente nuclear de Fukushima, el cual provocó que algunos países renunciaran a un programa nuclear. Dentro del desarrollo de la energía nuclear se pueden identificar varios tipos de reactores que corresponden a una generación característica como se muestra en la Figura 1.1.

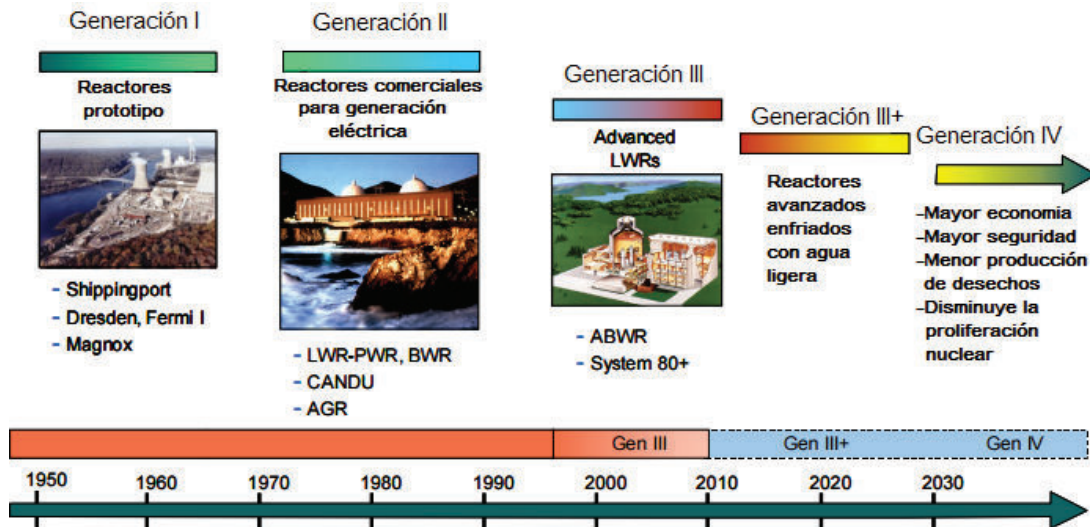


Figura 1.1. Generaciones de Reactores Nucleares
(Fuente: DOE., 2002)

Los reactores de primera generación corresponden a prototipos experimentales de reactores nucleares destinados a determinar la viabilidad de generar energía eléctrica a partir de la energía nuclear, se desarrollaron en Inglaterra, Estados Unidos y Rusia a partir de la década de los 50 hasta los 60, los modelos desarrollados fueron Shippingport, Dresden, Fermi I y Magnox, utilizaban como combustible Uranio Natural, la mayor parte de estas instalaciones han dejado ya de funcionar (DOE., 2002).

La segunda generación de reactores nucleares abarca a los reactores comerciales que fueron construidos entre las décadas de los 70 y finales de los 90. Los tipos de reactores que se consideran de segunda generación son (UNAN., 2005):

- PWR (Presurized Water Reactor)
- BWR (Boiling Water Reactor)
- CANDU

- WER/BMK es un reactor de diseño soviético (Reaktor Bolshoy Moschnosti Kanalniy)

De estos tipos de reactores se construyeron 265 reactores PWR, 94 reactores BWR y 44 reactores CANDU y la gran mayoría se encuentra actualmente en estado operativo (González L., 2010). La Tabla 1.1 muestra un registro histórico por país del número de centrales nucleares en operación y la potencia generada (Foro Nuclear., 2015).

Como se puede observar en la Tabla 1.1 existen 438 centrales nucleares en operación que generan cerca de 380 GWe. De los datos encontrados en foro nuclear, los reactores nucleares proyectados para construcción en el mundo son 70, planificados 183 los cuales estarán en operación en 8 a 10 años, entre los países que planifican la construcción de centrales nucleares se encuentran China, Emiratos Árabes Unidos, Estados Unidos, India, Irán, Japón, Rusia y Vietnam (DOE., 2002, Foro Nuclear., 2015).

Los reactores nucleares de tercera generación se basan en sus antecesores, mejorando ciertas características como incremento de vida útil y eficiencia, reducción de costos de construcción, mantenimiento e incorporación de seguridades inherentes, se conocen además como reactores avanzados por agua ligera. Dentro de los reactores de tercera generación se encuentran los siguientes:

- ABWR (Advance Boiling Water Reactor)
- AP 600
- System 80+
- EPR (European Pressurized Reactor)

Los reactores de cuarta generación surgen como concepto en el año 2000 y pretenden disminuir todos los problemas que se asocian a la energía nuclear: seguridad, costo, eficiencia, manejo de residuos, combustible nuclear alternativo al Uranio y no proliferación (Diamandis P., 2013, NEA., 2012). Esta generación de reactores se amplia de manera detallada en la sección siguiente.

Tabla 1.1. Evolución de centrales nucleares en el mundo

	1970		1980		1990		2000		2013		2014	
	Mwe	Uds	Mwe	Uds	Mwe	Uds	Mwe	Uds	Mwe	Uds	Mwe	Uds
Alemania	927	8	10487	19	22127	21	21470	19	12068	9	12003	9
Argentina	0	0	335	1	935	2	935	2	935	2	1627	3
Armenia	0	0	751	2	375	1	375	1	375	1	376	1
Bélgica	10	1	1838	4	5927	7	5927	7	5927	7	5943	7
Brasil	0	0	0	0	609	1	1884	2	1884	2	1901	2
Bulgaria	0	0	1224	3	2585	5	3538	6	1906	2	1906	2
Canadá	228	2	5254	10	13409	20	15165	22	13500	19	13553	19
Corea del Sur	0	0	576	1	7733	9	13746	16	20721	23	20656	23
China	0	0	0	0	0	0	2186	3	16038	20	19095	22
Eslovaquia	0	0	816	2	1759	4	2631	6	1815	4	1816	4
Eslovenia	0	0	0	0	688	1	688	1	688	1	696	1
España	141	1	621	2	7262	8	7262	8	7121	8(*)	7002	8(*)
Estados Unidos	6,636	19	54597	69	106245	111	102657	104	99081	100	98756	99
Finlandia	0	0	2752	4	2752	4	2752	4	2752	4	2741	4
Francia	1454	8	14160	22	55840	56	63260	59	63130	58	63130	58
Hungría	0	0	0	0	1889	4	1889	4	1889	4	1889	4
India	300	2	577	4	1189	7	2603	14	5308	21	5302	21
Irán	0	0	0	0	0	0	0	0	915	1	915	1
Italia	563	3	1423	4	0	0	0	0	0	0	0	0
Japón	1248	5	14957	23	30867	41	43241	52	42388	48	42569	48
Kazajistán	0	0	52	1	52	1	0	0	0	0	0	0
Lituania	0	0	0	0	2370	2	2370	2	0	0	0	0
Méjico	0	0	0	0	665	1	1330	2	1330	2	1600	2
Países Bajos	55	1	537	2	537	2	482	1	482	1	485	1
Pakistán	0	0	90	1	90	1	390	2	690	3	725	3
Reino Unido	3501	27	6474	33	11567	37	11671	33	9243	16	10038	16
República Checa	0	0	0	0	1878	4	2881	5	3884	6	3766	6
Rumanía	0	0	0	0	0	0	650	1	1300	2	1310	2
Rusia	786	5	8557	20	18898	29	19848	30	23643	33	25264	34
Sudáfrica	0	0	0	0	1860	2	1860	2	1860	2	1830	2
Suecia	10	1	6044	8	10674	12	10074	11	9474	10	9487	10
Suiza	365	1	2088	4	3308	5	3308	5	3308	5	3252	5
Taiwan	0	0	1208	2	5032	6	5032	6	5032	6	4927	6
Ucrania	0	0	2046	3	12847	15	11207	13	13107	15	13168	15
Mundo	16224	84	137464	244	331969	419	363312	0	371794	0	377728	438
Núm. de países	14		24		30		31		31		31	

(Fuente: DOE., 2002)

Programas de desarrollo para los reactores nucleares de cuarta generación.

A partir de 1997 con el Protocolo de Kioto para reducir emisiones de gases de efecto invernadero, conociendo que el mayor porcentaje de estas emisiones se deben a la generación de electricidad, sumado al incremento de la demanda energética mundial que se prevé que sea del 37% hasta el 2040, (IEA., 2014) la utilización de la energía nuclear dentro de la matriz energética mundial se potencializa, al considerarse como una energía limpia, libre de producción de Dióxido de Carbono.

Según el escenario planteado por la Agencia Internacional de Energía la capacidad nuclear mundial se incrementa en un 60%, desde 392 GWe en el año 2013 hasta más de 620 GWe en el 2040 protagonizado principalmente por India, China, África, Oriente Medio y el Sudeste asiático (IEA., 2015b). Para dejar de lado los inconvenientes que ha presentado la energía nuclear y así asegurar cubrir las necesidades energéticas mundiales de manera sostenible en un simposio organizado por la Organización de las Naciones Unidas (ONU), avalado por la Agencia Internacional de Energía Atómica (AIEA) se propone la búsqueda de una nueva generación de reactores nucleares. Esta nueva generación corresponde a la cuarta generación de reactores nucleares la cual considera diseños innovadores que contemplan (Perera J., 2004):

- Seguridad y confiabilidad
- Resistencia a la proliferación de armas nucleares
- Rentabilidad económico
- Generación mínima de residuos o desechos nucleares
- Uso de combustibles alternativos al Uranio (Torio y Plutonio)

En septiembre del 2000, los estados miembros de la AIEA reconocieron la necesidad de realizar actividades de investigación y desarrollo encaminadas al fomento de innovaciones en el área de diseño de reactores nucleares nace así el proyecto INPRO (The International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles), y por parte del Departamento de Energía de los Estados Unidos se crea el IV Foro Internacional de la Generación GIF (Micó F., 2010).

El GIF está formado por 10 países miembros y coordina las actividades de desarrollo e investigación relacionadas con seis sistemas de energía nuclear estos son (UNAM. 2005) :

- Reactores rápidos refrigerados por sodio
- Reactores rápidos refrigerados por plomo
- Reactores rápidos refrigerados por gas,
- Reactores de sales fundidas,
- Reactores refrigerados por agua supercrítica y
- Reactores de muy alta temperatura.

Además se espera que en un futuro, a partir de 2030 puedan introducirse al mercado y sustituyan a los reactores actuales. El GIF presenta periódicamente información sobre el estado de desarrollo técnico de cada uno de los tipos de reactores antes mencionados (NEA., 2008). El INPRO y el GIF colaboran principalmente en las esferas de la seguridad, la resistencia a la proliferación y la economía de los reactores nucleares innovadores.

En el marco del INPRO se ejecutan proyectos en colaboración entre los Estados Miembros de la AIEA, que analizan escenarios de desarrollo y examinan la manera como la energía nuclear puede contribuir a los objetivos de desarrollo sostenible de las Naciones Unidas en el siglo XXI. Los resultados de estos proyectos pueden ser aplicados por los Estados Miembros de la AIEA en sus estrategias nacionales de energía nuclear y pueden propiciar el logro, mediante la cooperación internacional, de innovaciones beneficiosas en la esfera de la tecnología nuclear y su despliegue.

Como parte del INPRO se encuentran los Proyectos Coordinados de Investigación CRP por sus siglas en inglés “Coordinated Research Project” para la investigación y desarrollo de pequeños reactores innovadores dentro de los cuales el reactor Fixed Bed Nuclear Reactor (FBNR) forma parte (Banches E., 2012).

1.1.2. Reactor Nuclear de Lecho Fijo FBNR

El reactor Nuclear de Lecho Fijo FBNR por sus siglas en inglés (Fixed Bed Nuclear Reactor) basa su funcionamiento en los reactores de agua presurizada (PWR). Tiene un pequeño tamaño (2m de diámetro y 6 m de alto) en comparación con los reactores PWR, genera una

potencia de 70 MWe, es de diseño modular, no requiere reabastecimiento de combustible en sitio, ya que puede operar largos periodos de tiempo con el combustible cargado en la fábrica de construcción y cuenta con un sistema de seguridad inherente. Todas estas características le permiten al reactor FBNR ser parte del programa INPRO de la AIEA ya que cumple con los requerimientos establecidos para los reactores nucleares de cuarta generación, seguridad, rentabilidad económica (AIEA., 2011).

Este tipo de reactor tiene la capacidad de ser un reactor multiuso, puede ser usado como una planta de doble propósito, generar electricidad y producir agua desalinizada, además de su posible uso para calefacción de viviendas. El reactor FBNR es una propuesta del investigador PhD. Farhang Sefidvash, los fundamentos y tecnología de este reactor son de dominio público y actualmente se encuentra en la fase de estudio, por ahora se están desarrollando investigaciones en los campos de la neutrónica, sistema de control, diseño estructural y transferencia de calor.

Descripción de los componentes del Reactor FBNR.

En el diseño del reactor FBNR se identifican módulos, Figura 1.2 , los cuales cumplen una función específica e independiente, estos son:

- El núcleo
- El generador de vapor en la parte superior y en la parte inferior
- La cámara de combustible

Según el diseño propuesto por Sefidvash, F., **el núcleo del reactor** FBNR lo constituye un cilindro de 1.71 m de diámetro y 2 m de alto y las esferas de combustible de 15 mm de diámetro que se encuentran en su interior, a través de las cuales circula agua presurizada a 160 bar, que actúa como fluido refrigerante, el cual además de retirar calor asegura que los materiales que constituyen los elementos combustibles no se fundan, el refrigerante asciende por el núcleo y es recirculado, para operar en un circuito cerrado.

Los elementos combustibles se basan en la tecnología del reactor HTGR (Reactor de alta temperatura enfriado por gas) en el cual los elementos combustibles tienen forma esférica.

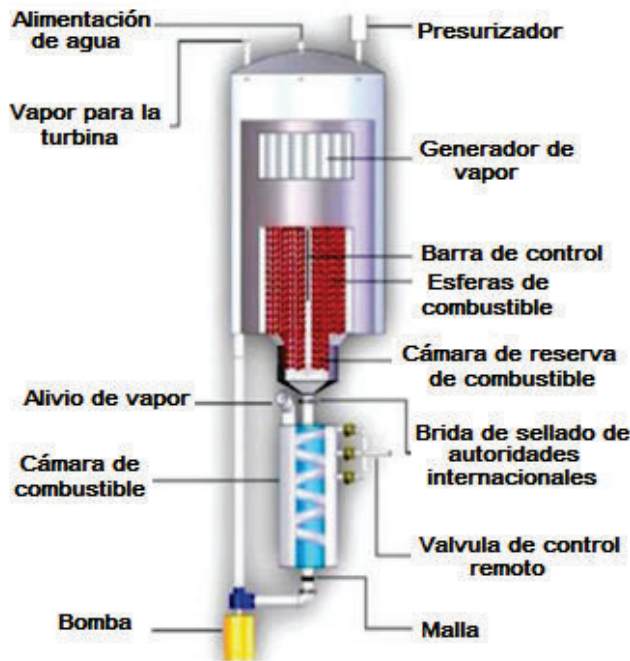


Figura 1.2. Descripción gráfica del reactor FBNR
(Fuente: Sefidvash F., 2010)

El generador de vapor consiste en un intercambiador de calor de tubos y coraza. Al estar basado en el diseño del reactor PWR el equipo posee un sistema de control de presión.

Las esferas de combustible son elaboradas con CERMET, una mezcla de cerámica y metal, estos materiales determinan las características de resistencia a altas temperaturas y deformación de los elementos combustibles. La Figura 1.3 muestra un corte transversal de una esfera de combustible.

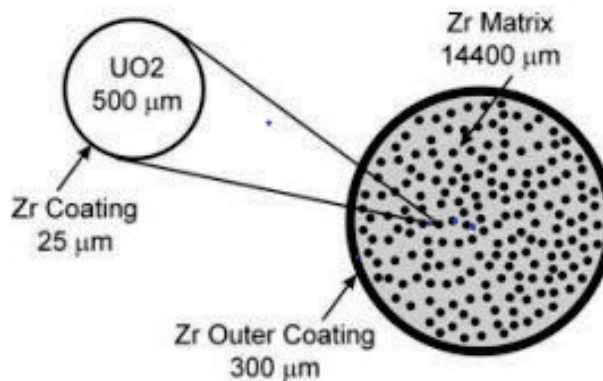


Figura 1.3. Descripción elemento combustible-material CERMET
(Fuente: AIEA., 2011)

La Figura 1.3 muestra las esferas de combustible las mismas que están compuestas por dióxido de Uranio como combustible nuclear, el cual se encuentra cubierto por un revestimiento de Zirconio de $25 \mu m$ de espesor, esta estructura se encuentra en una matriz de Zirconio, cuyo recubrimiento externo corresponde a una aleación de Zirconio (Zircaloy-4) y tiene un espesor de $300 \mu m$ (Senor D., 2007, Sefidvash F., 2010).

Para colocar la capa que recubre al Dióxido de Uranio y a la matriz de Zirconio se realiza el proceso de Deposición Química de Vapores (CVD por sus siglas en inglés), mientras que el proceso de fabricación de la matriz se da por presión del material a altas temperaturas entre los $(300- 400)^\circ C$. En la Tabla 1.2 se detalla las propiedades térmicas del material CERMET.

Tabla 1.2. Propiedades térmicas del CERMET

Propiedades	Temperatura Superficial $340^\circ C$
Conductividad térmica	$28.2 \left[\frac{W}{m \cdot ^\circ K} \right]$
Calor específico	$431 \left[\frac{J}{kg \cdot ^\circ K} \right]$
Densidad	$6940 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$

(Fuente: Senor D., 2007)

La cámara de combustible consiste de un tubo helicoidal de 40 cm de diámetro donde se colocan las esferas de combustible el mismo que cuenta con un sistema de refrigeración. La cámara es sellada por la entidad reguladora para evitar la proliferación del combustible nuclear.

El sistema de seguridad se encuentra diseñado para que la bomba esté siempre en estado de “normalmente apagado”, y se active una vez que todas las señales indiquen que es posible un funcionamiento seguro.

1.2. Termo hidráulica de los reactores de lecho fijo

1.2.1. Clasificación de los reactores de lecho fijo

Un reactor de lecho fijo consiste en una columna cilíndrica, formada por partículas sólidas, por las cuales atraviesa un fluido, pudiendo ser líquido o gas. Como característica de este tipo de reactores al atravesar el fluido por el lecho, este no provoca el movimiento de las partículas que lo forman es decir estas se mantienen en reposo y en contacto unas con

otras (Zambon M., 2008). Los lechos fijos se clasifican por el material que los constituye en lechos fijos rellenos o empacados y porosos.

Los lechos fijos rellenos están formados por partículas sólidas y homogéneas como es el caso del reactor FBNR, mientras que los lechos porosos se conforman con materiales porosos, como por ejemplo esponjas de espuma de poliuretano y colchones de espuma de caucho.

Los reactores de lecho fijo empacado son utilizados en la industria química, bioquímica, petroquímica y alimentaria en diversas aplicaciones como por ejemplo: secado, absorción e intercambio iónico, lixiviación de partículas sólidas, intercambiadores de calor y en la industria nuclear como en el diseño del reactor FBNR para la producción de energía (Kunni D., 2006a).

1.2.2. Características de los lechos fijos empacados

Las características fundamentales de un lecho fijo empacado son: Porosidad y Efecto de pared, las cuales se describen a continuación (Huk J., 2014).

Porosidad.

Es la relación que existe entre el volumen del espacio libre que dejan las partículas en el lecho y el volumen total del lecho, su valor varía de 0 a 1, se determina como se muestra en la Ec. 1.1.

$$\varepsilon = \frac{V_e}{V_t} \quad (\text{Ec. 1.1})$$

Donde:

ε = Porosidad

V_e = Volumen del espacio libre, [m^3]

V_t = Volumen total del lecho, [m^3]

La porosidad depende del arreglo que tengan las partículas (dispuesto al azar o geoméricamente estructurado) y del tipo de partículas con las que se trabaje (esferas, cilindros o anillos).

Efecto de pared.

Es la característica que se relaciona con el parámetro denominado relación de aspecto, el cual relaciona al diámetro del cilindro o recipiente contenedor (D) y el diámetro de la partícula (d_p), el valor obtenido establece la influencia de las paredes del recipiente en el comportamiento del fluido. Según Nemeč D. y Levec J. un valor mayor a 10 en la relación de aspecto de un lecho empacado ($D/d_p > 10$), permite considerar como despreciables los efectos de las paredes en el lecho, por ejemplo cuando se obtiene un valor menor a 10, las paredes del recipiente influyen en la caída de presión haciendo que esa aumente (Nemeč D., 2005).

1.2.3. Tipos de estructuras para un lecho fijo empacado

Los tipos de estructuras en un lecho fijo empacado pueden ser:

- Aleatoria
- Geométrica

En la estructura aleatoria las partículas que conforman el lecho se encuentran ubicadas en forma desordenada, tiene como ventaja una gran área superficial de contacto, la desventaja de esta configuración radica en que no es posible generar una configuración aleatoria de las partículas que conforman el lecho en un programa de diseño asistido por computadora, para ello se requiere emplear programas computacionales que empleen el método de elementos discretos, análisis que no forma parte del presente proyecto.

Los lechos de estructura geométrica están basados en las estructuras de redes cristalinas presentes en los metales. las cuales son (Casabó J., 2007):

- Estructura cúbica centrada en el cuerpo
- Estructura cúbica centrada en las caras
- Estructura Hexagonal

Cada una de estas estructuras se caracteriza por la configuración de su celda unitaria, la cual se repite a lo largo del lecho. La ubicación de las partículas del lecho bajo estas estructuras asegura que el espacio disponible sea ocupado eficazmente.

Además los empaques estructurados establecen trayectorias definidas de los fluidos dentro de la columna, tienen caídas de presión menores y son capaces de manejar mayores relaciones de flujo con respecto a los empaques aleatorios.

En el reactor FBNR al manejar material nuclear no resulta seguro colocarlo en distribuciones aleatorias, ya que podría provocar una reacción en cadena descontrolada, llevando al reactor nuclear a un estado supercrítico es decir a ser considerado como una bomba atómica, es por ello que para el desarrollo del presente proyecto solo se consideran las estructuras cúbica centrada en el cuerpo (BCC) y cúbica centrada en las caras (FCC).

Estructura cúbica centrada en el cuerpo.

En la celda unitaria de la estructura BCC cada partícula de la estructura, está rodeada por ocho partículas adyacentes y las partículas de los vértices están en contacto según las diagonales del cubo como se puede observar en la Figura 1.4



Figura 1.4. Celda Unitaria configuración BCC
(Fuente: Casabó J., 2007)

Estructura cúbica centrada en las caras.

En la estructura FCC la celda unitaria está constituida por una partícula en cada vértice y una partícula en cada cara del cubo, cada partícula está rodeada por doce partículas adyacentes y las partículas de las caras están en contacto como se muestra en la Figura 1.5.

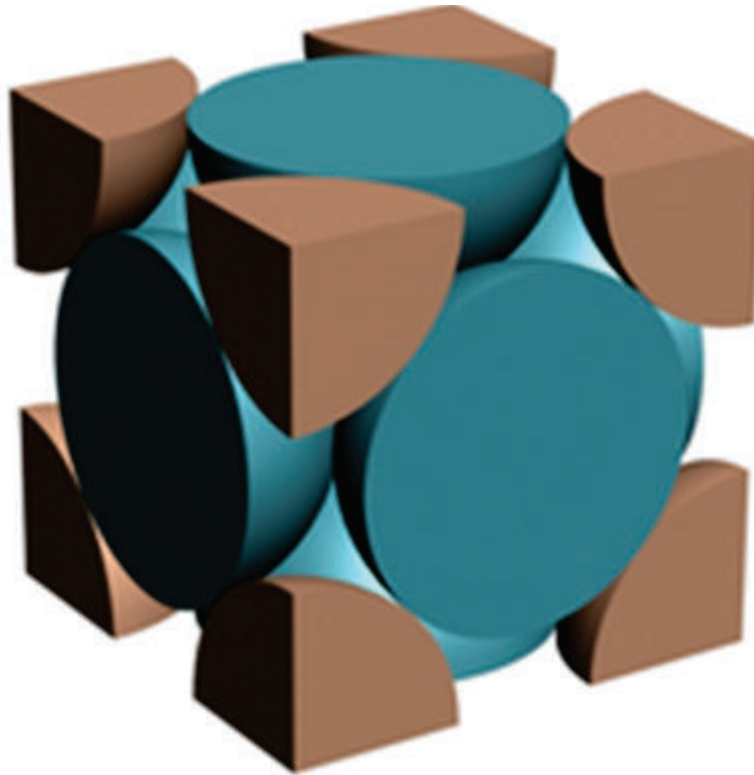


Figura 1.5. Celda Unitaria configuración FCC
(Fuente: Casabó J., 2007)

1.2.4. Análisis hidráulico de un fluido dentro de un lecho fijo

Los fundamentos teóricos que pretenden explicar el comportamiento de un fluido dentro de un lecho empacado fijo nacen a mediados del siglo XIX, en este apartado se muestran los avances alcanzados en el tema y las relaciones matemáticas que serán utilizadas en el presente estudio.

Régimen de fluido

Para el movimiento de un fluido dentro de un lecho fijo es importante considerar la distribución de velocidades del fluido, por ejemplo para una sola esfera sometida a un flujo laminar la distribución de velocidades se puede observar en la Figura 1.6, la velocidad del fluido va desde cero en el contacto con la superficie hasta la velocidad máxima para las zonas alejadas de la superficie. (Gallegos A ., 2010).

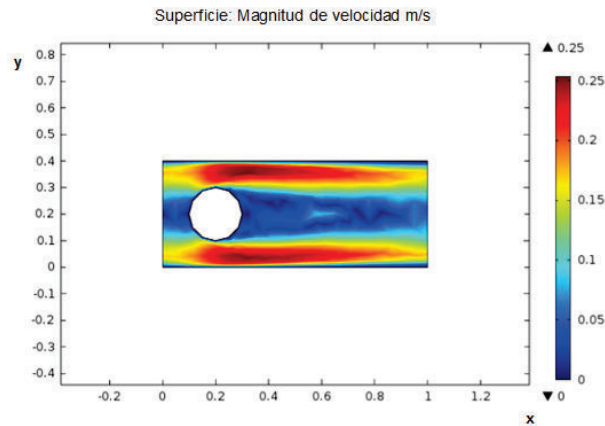


Figura 1.6. Perfil de velocidad - Fluido a través de una esfera
(Fuente: Propia)

Para los lechos empacados la distribución de velocidades varía radialmente, siendo menor en el centro del lecho. La formación de vórtices o remolinos en el fluido que atraviesa un lecho fijo empacado no suceden ya que varios estudios han demostrado que las partículas contiguas estabilizan el flujo. (Schwartz C ., 1953). El tipo de régimen de un fluido es determinado por el número de Reynolds, para lechos fijos empacados los números de Reynolds más utilizados son el número de Reynolds de partícula (Re_{dp}) y el número de Reynolds modificado (Re_m), a continuación se detalla la expresión matemática que permite el cálculo de cada uno de ellos y los valores establecidos para la clasificación de un fluido en régimen laminar, en transición o turbulento.

El número de Reynolds de partícula considera únicamente al diámetro de partícula y se calcula mediante la Ec. 1.2 (Huk J., 2014).

$$Re_{dp} = \frac{\rho v_s d_p}{\mu} \quad (\text{Ec. 1.2})$$

Donde:

$$\rho = \text{Densidad, } \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

$$v_s = \text{Velocidad superficial, } \left[\frac{m}{s} \right]$$

$$d_p = \text{Diámetro de la partícula, } [m]$$

$$\mu = \text{Viscosidad del fluido, } [Pa.s]$$

La velocidad superficial se calcula como la razón entre el caudal del fluido y el área del lecho. En la Tabla 1.3 se detallan los regímenes de fluido en base a los valores del Número de Reynolds de partícula.

Tabla 1.3. Números de Reynolds de partícula y tipos de régimen

Número de Reynolds	Tipo de régimen
$Re_{dp} < 10$	Laminar
$10 < Re_{dp} < 300$	Transición
$Re_{dp} > 300$	Turbulento

(Fuente: Ziórkowska I., 1988)

El número de Reynolds modificado considera el volumen ocupado por las partículas en el lecho y se calcula mediante la Ec. 1.3 (Neutrium., 2014).

$$Re_m = \frac{\rho v_s d_p}{\mu(1 - \epsilon)} \quad (\text{Ec. 1.3})$$

En la Tabla 1.4 se detallan los regímenes de fluido en base a los valores del número de Reynolds modificado.

Tabla 1.4. Números de Reynolds modificado y tipos de régimen

Número de Reynolds	Tipo de régimen
$Re_m < 10$	Laminar
$10 < Re_m < 1000$	Transición
$Re_m > 1000$	Turbulento

(Fuente: Neutrium., 2014)

Modelo teórico de la caída de presión en un lecho fijo

Para un lecho fijo empacado la caída de presión se debe al flujo de fluido a través del lecho, es por ello que se relaciona directamente con la velocidad superficial del fluido y se ve influenciada por otros factores como la porosidad del lecho, la densidad y viscosidad del

fluido. Para definir una expresión matemática que permita determinar la caída de presión en el lecho fijo los modelos teóricos definidos por Blake y Kozeny, Burke y Plumber y Ergun consideran al flujo en un lecho empacado como una analogía del paso de flujo a través a la de un haz de tubos, colocados de forma aleatoria. La caída de presión por fricción se estima mediante la ecuación de Fanning, como se muestra en la Ec. 1.4.

$$\frac{\Delta P}{L} = f_F = \frac{\rho v}{2D} \quad (\text{Ec. 1.4})$$

Donde:

D = Diámetro interno de conducción, [m]

v = Velocidad media de circulación, [$\frac{m}{s}$]

f_F = Factor de fricción

El factor de fricción es función de la rugosidad relativa y del número de Reynolds. Para flujos laminares ($Re < 2100$) el factor de fricción es igual a $f_F = 64/Re$ y es independiente de la rugosidad relativa de la superficie. Para flujos turbulentos ($Re > 30000$) el factor de fricción se calcula en función de la rugosidad y del diámetro interno de conducción.

Si el flujo a través del fluido es laminar es decir $Re_m < 10$ se tiene la ecuación de Blake y Kozeny para la caída de presión Ec. 1.5 (Camacho F., 1985).

$$\frac{\Delta P}{L} = 150 \frac{(1 - \varepsilon)^2 \mu v_s}{\varepsilon^3 d_p^2} \quad (\text{Ec. 1.5})$$

Para flujo turbulento $Re_m > 1000$ se tiene la ecuación de Burke y Plumber Ec. 1.6 (Camacho F., 1985).

$$\frac{\Delta P}{L} = 1.75 \frac{(1 - \varepsilon) \rho v_s^2}{\varepsilon^3 d_p} \quad (\text{Ec. 1.6})$$

Ergun propone su ecuación para régimen de transición ($10 < Re_m < 1000$) como la suma de las dos ecuaciones antes estudiadas Ec. 1.7 (Kunni D., 2006b).

$$\frac{\Delta P}{L} = 1.75 \frac{(1 - \varepsilon) \rho v_s^2}{\varepsilon^3 d_p} + 150 \frac{(1 - \varepsilon)^2 \mu v_s}{\varepsilon^3 d_p^2} \quad (\text{Ec. 1.7})$$

Las ecuaciones obtenidas por Blake y Kozeny, Burke y Plumber y Ergun son relativas a sistemas con flujo circulante único y a lechos fijos con partículas esféricas, si se requiere realizar el análisis de caída de presión en lechos empacados con otra forma de partícula se

deberán corregir los factores 150 y 1.75 conocidos como factores de viscosidad e inercial respectivamente (Nemec D., 2005).

1.2.5. Transferencia de calor en un lecho fijo

Mecanismos de transferencia.

Los mecanismos de transferencia de calor que se presentan en un lecho fijo son los siguientes (Catton I., 2012):

- Transferencia de calor por convección entre el fluido y las paredes del contenedor
- Transferencia de calor por convección desde las partículas hacia el fluido que atraviesa el lecho
- Transferencia de calor por conducción desde las paredes del recipiente a las partículas del sólido que constituyen el lecho
- Transferencia de calor por conducción en la partícula y entre las partículas que conforman el lecho

Varios de los mecanismos de transferencia de calor pueden ser ignorados en relación con otros debido a condiciones impuestas para el análisis, por ejemplo considerar condiciones de pared adiabática, lo que provoca que la conducción radial en el lecho y la transferencia de calor entre el recipiente y el lecho sean despreciables.

Coefficiente de transferencia de calor por convección.

Existen varias correlaciones matemáticas la mayoría empíricas o semi-empíricas para determinar el número de Nusselt y mediante él, determinar el valor del coeficiente de transferencia de calor por convección (h). Además los números adimensionales de Reynolds y Prandtl son de interés para este tipo de correlaciones. Entre las correlaciones empíricas para la determinación del número de Nusselt en lechos fijos empacados con generación de calor se encuentra la relación establecida por Zhoun F. y Catton I., su expresión matemática se muestra en la Ec. 1.8 (Catton I., 2012).

$$Nu = 0.23Re^{0.7}Pr^{1/3} \quad (\text{Ec. 1.8})$$

Donde:

Nu = Número de Nusselt

Pr = Número de Prandlt

Para determinar el valor del número de Nusselt se utiliza la Ec. 1.9

$$Nu = \frac{h * d_p}{k_f} \quad (\text{Ec. 1.9})$$

Donde:

h = Coeficiente de transferencia de calor por convección, $[\frac{W}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}]$

k_f = Conductividad térmica del fluido, $[\frac{W}{\text{m} \cdot \text{K}}]$

El valor del número de Prandlt se determina mediante la Ec. 1.10

$$Pr = \frac{C_{pf} * \mu}{k_f} \quad (\text{Ec. 1.10})$$

Donde:

C_{pf} = Calor específico del fluido, $[\frac{J}{\text{kg} \cdot \text{K}}]$

μ = Viscosidad dinámica del fluido, $[\text{Pa} \cdot \text{s}]$

1.3. Paquetes computacionales especializados en análisis termo hidráulico

Desde el final de la década de los setenta con el desarrollo de los computadores de gran potencia han aparecido en el mercado paquetes informáticos o softwares especializados en termo hidráulica de Fluidos, sus primeras aplicaciones se registran en el campo militar, actualmente son utilizados como herramienta fundamental de la ingeniería de diseño, ya que permiten el ahorro de tiempo y dinero en la elaboración de prototipos.

Para el caso del análisis termo hidráulico de lechos empacados los Softwares comerciales permiten entender a detalle lo que ocurre en el lecho mediante la obtención de perfiles de velocidad, temperatura y datos importantes que no se podrían determinar experimentalmente como por ejemplo el estudio de los espacios intersticiales del lecho, esto permite predecir puntos críticos de estancamiento de fluido (Jones D., 2012).

1.3.1. Descripción de los Paquetes Computacionales para simulación

Los paquetes computacionales especializados en el análisis termo hidráulico de fluidos se fundamentan en la Dinámica Computacional de Fluidos (CFD por sus siglas en inglés), que tiene como base los principios de la conservación de la masa, energía y cantidad de momento. Los softwares que trabajan con CFD tienen básicamente el siguiente ciclo de ciclo de trabajo:

- Pre procesamiento
- Procesamiento
- Post-procesamiento

La Figura 1.7 describe las etapas del modelado en CFD.

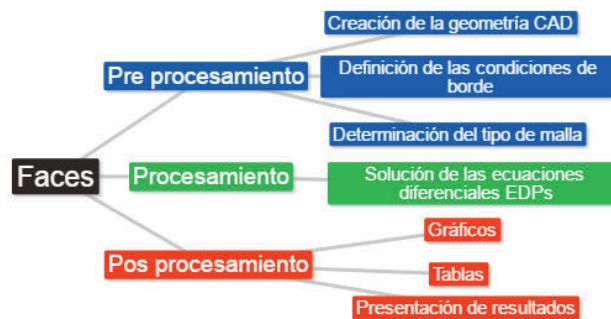


Figura 1.7. Descripción de las etapas del modelado en CFD
(Fuente: Propia)

Pre procesamiento, en este paso se realizan tres tareas principales:

- Creación de la Geometría CAD
- Definición de las condiciones de borde
- Determinación del tipo de malla

Procesamiento, en esta etapa se resuelven las ecuaciones diferenciales parciales (EDPs), para ello el programa realiza los siguientes pasos (Wendt J., 2009) :

- Las ecuaciones diferenciales parciales se integran sobre todos los volúmenes de control de la región de interés, de acuerdo al mallado determinado

- Estas ecuaciones integrales se convierten en un sistema de ecuaciones algebraicas debido a la generación de aproximaciones para los términos de las ecuaciones integrales
- Las ecuaciones algebraicas se resuelven por iteración. Es necesaria la iteración debido a la naturaleza no lineal de las ecuaciones

Post procesamiento, consiste en la presentación de datos de manera cuantitativa y cualitativa. Para ello los paquetes computacionales ofrecen varias alternativas de presentación entre ellas:

- Gráficos
- Tablas de resultados
- Mapas de contorno

En las siguientes secciones se describe los software más destacados para el análisis termo hidráulico.

SolidWorks

En el año 1995 se comercializa como un software de diseño asistido por computador (CAD) utilizado para modelado mecánico en 3D, bajo un entorno intuitivo y fácil de manejar.

Con la herramienta SolidWorks Flow Simulation se puede analizar el comportamiento termo hidráulico de fluidos, mediante la resolución iterativa de las ecuaciones gobernantes, obtenidas de los balances de masa, cantidad de movimiento y energía, utilizando elementos finitos (Matsson J., 2013).

Entre las limitantes principales del software SolidWorks Flow Simulation se tienen las siguientes:

- No permite un análisis detallado de cambios de fase en flujos multifásicos
- Permite un único mallado con celdas rectangulares

ANSYS

El Software de simulación ANSYS presta soporte a la ingeniería desde 1970, trabaja en análisis termo hidráulico de fluidos con la herramienta ANSYS CFX bajo la teoría de volúmenes finitos. Este Software es capaz de modelar:

- Flujos estables y transitorios
- Fluidos no Newtonianos
- Fluidos multifásicos
- Flujo en múltiples sistemas de referencia

Además este Software proporciona información sobre el progreso de convergencia para la resolución de las ecuaciones diferenciales parciales y es posible que los parámetros que son determinados en el Pre-proceso puedan ser ajustados en la etapa de Procesamiento sin que esta se detenga (Wendt J., 2009).

COMSOL Multiphysics

El Software Comsol MultiPhysics pertenece a la empresa COMSOL fundada en 1986 en Estocolmo. La diferencia de este software con los anteriores es que es posible modelar el sistema a analizar a partir de la representación geométrica (CAD) en la que se fijan las características del sistema y condiciones iniciales del mismo o bien a través de la introducción de las ecuaciones que modelan el problema, permitiendo así la simulación simultánea de las 2 maneras diferentes, una de la forma intrínseca y la segunda la recomendada por el analista. Entre las características principales del programa se encuentran:

- Ilimitadas prestaciones a sistemas multifásicos
- Generación automática y adaptativa de mallas, con un control explícito e interactivo sobre su tamaño
- Extensa biblioteca de materiales y modelos
- Cuenta con un módulo específico para fluidos en medios porosos

- Generación automática y adaptativa de mallas con un control explícito e interactivo sobre su tamaño

1.3.2. Análisis comparativo de paquetes computacionales

La Tabla 1.5 y la Figura 1.8 muestran el análisis de las cualidades cuantitativas y cualitativas más sobresalientes de cada uno de los programas de simulación antes descritos.

Tabla 1.5. Tabla de calificaciones

Excelente =10 Muy Bueno = 8 Bueno = 7 Regular =5 Pésimo = 2	SolidWorks	COMSOL MultiPhysics	ANSYS
Compatibilidad con el sistema operativo(Windows)	10	10	10
Estabilidad en el manejo de datos	7	10	10
Tiempo de simulación	5	8	7
Fácil interfaz CAD-3D	5	7	8
Uso de Memoria RAM	8	8	8
Fácil introducción de condiciones iniciales	5	10	8
Interacción multifísica	2	10	8
Comunicación e intercambio de datos con otros Software	5	8	10
Costo de licencias	5	8	7
Facilidad de licencias de prueba	2	10	2
Capacitación gratuita online	2	10	10
Índice de calificación /10	4.7	8.25	7.33

(Fuente: Propia)

Considerando los valores de la Tabla 1.5 se observa que el programa que presenta mayor estabilidad en la parte computacional y manejo de datos es el ANSYS, sin embargo el costo de licencias operativas es muy elevado.

Se debe tener en cuenta que el computador debe cumplir ciertos requerimientos como: procesadores, tarjetas madres, y memorias RAM de última generación. El programa SolidWorks cumple con requerimientos básicos de simulación este inconvenientes lo

vuelve impreciso al momento de exigir mallados complejos, produciendo así errores en el proceso de validación de resultados.

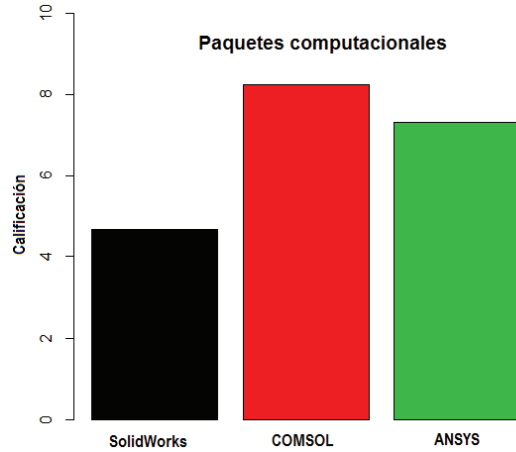


Figura 1.8. Comparación de paquetes computacionales
(Fuente: Propia)

Por otra parte COMSOL MultiPhysics presenta una mayor estabilidad de simulación y de adquisición de datos, además al tener una fácil comunicación con otros programas de simulación proporciona un mejor pos procesamiento de datos. El soporte técnico y el bajo costo de licencias que este software ofrece a nivel mundial hace del mismo un software accesible para la simulación. Por estas cualidades operativas se trabajará con COMSOL MultiPhysics para la simulación del reactor nuclear FBNR.

2. SIMULACIÓN DEL LECHO FIJO Y MODELADO MATEMÁTICO DEL REACTOR NUCLEAR FBNR

En este capítulo se analizará al reactor FBNR con el software COMSOL Multiphysics, utilizando los diferentes módulos de estudio tales como: el de transferencia de calor, flujo laminar y presión de fluido. El modelado matemático se centrará en la obtención de ecuaciones que describan el comportamiento térmico del fluido refrigerante del reactor y de la transferencia de calor del combustible nuclear en forma de esferas, también se obtendrá el perfil de presiones que se genera en el interior del lecho del reactor.

2.1. Simulación del lecho fijo del reactor nuclear FBNR

La simulación por el método del elemento finito y discreto en los últimos años se ha establecido con gran fuerza tanto en la industria como en la investigación, y todo esto debido a la facilidad del diseño asistido por computadora, los bajos costos de fabricación y la reducción de prototipos de pruebas. La fiabilidad de los datos de diseño que este método proporciona son aceptables y confiables hasta cierto punto.

COMSOL Multiphysics es un software que proporciona una interfaz amigable donde se puede hacer diferentes estudios físicos en una misma corrida de simulación, siendo el caso de la transferencia de calor conjugada con la mecánica de fluidos, también muestra el estado de convergencia de los datos al momento de iterar la ecuaciones que gobiernan el sistema lo que permite corregir ciertos valores de entrada durante el proceso de simulación.

Para trabajar con las simulaciones hay que delimitar el modelo físico de tal manera que sea sencillo, coherente, manipulable y adaptable al estudio que se esta proponiendo.

El tratamiento de los datos adquiridos del simulador serán procesados con el paquete estadístico **R** el cual tiene un entorno informático que incluye herramientas de análisis de datos y generación de gráficas. Es un software libre y funciona bajo cualquier sistema operativo. Es una herramienta ideal para la investigación, ya que permite el manejo de base de datos grandes con gran estabilidad (López A., 2015).

2.1.1. Parámetros fundamentales para la creación del modelo de simulación

Dimensiones del núcleo del reactor.

Las dimensiones necesarias para la creación del modelo 3D del núcleo del reactor se obtienen del diseño original propuesto por Farhang Sefidvash (Sefidvash F., 2016), Figura 2.1.

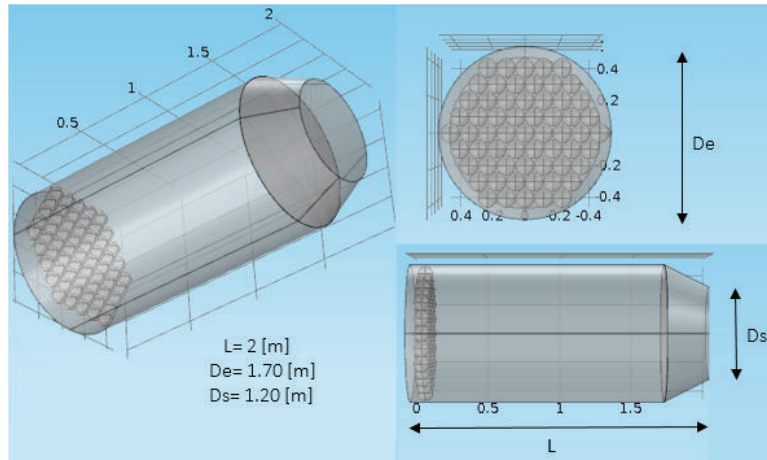


Figura 2.1. Dimensiones del núcleo del reactor
(Fuente: Propia)

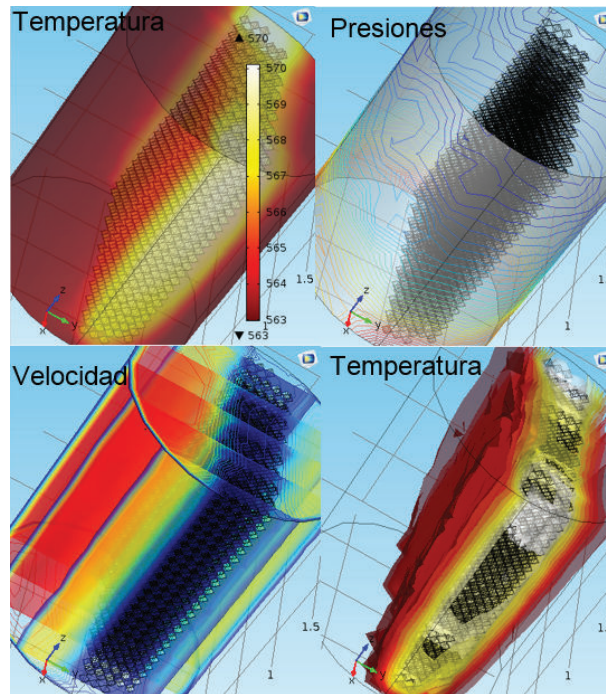


Figura 2.2. Simulaciones previas
(Fuente: Propia)

El núcleo del reactor presenta un aproximado de un millón seiscientos veinte mil esferas (1620000) el tiempo de simulación con todas estas esferas se alarga debido a que el mallado por cada esfera es de mil doscientos puntos (1200) teniendo un total de mil novecientos cuarenta y cuatro millones de grados de libertad (1944000000). Estudios previos muestran un tiempo de simulación de 324 horas por cada fenómeno físico, Figura 2.2, Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Importación de Datos

Ítem	Propiedades
Model	FCC 0.6.mph
Version	COMSOL 5.0.0.243
Nodes	1200
Número de grados de libertad	1944000000
Grados de libertad internos	4860000000
Tiempo de estudio	323 h, 56 mim, 17 s
Cantidad de esferas	1620000

(Fuente: Propia)

Para corregir este inconveniente el *Status report 72 - Fixed Bed Nuclear Reactor* recomienda hacer un estudio del núcleo en estado crítico proporcionando así un radio limite de análisis y longitud máxima del lecho, Figura 2.3. (Sefidvash F., 2016).

- Radio mínimo 0.30 [m]
- Longitud mínima 1.80 [m]

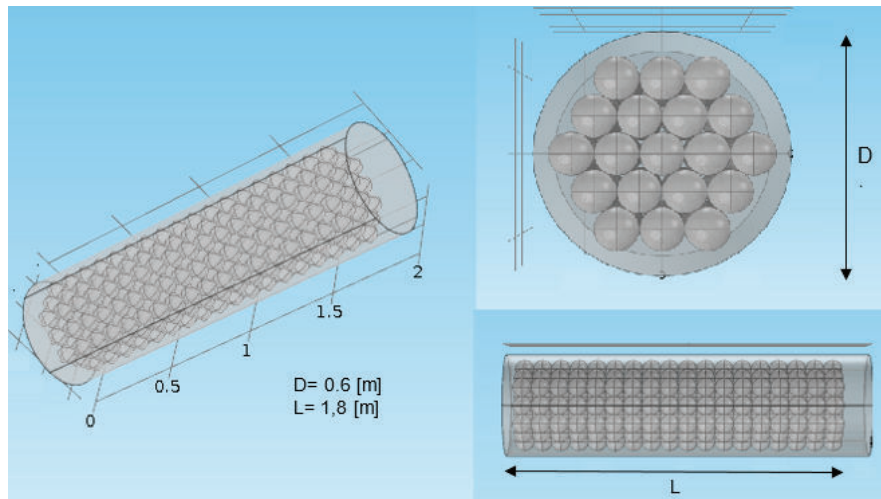


Figura 2.3. Nuevas dimensiones del núcleo del reactor
(Fuente: Propia)

2.1.2. Propiedades, dimensiones y consideraciones del combustible nuclear

La Tabla 2.2 muestra algunas de las propiedades y dimensiones del combustible nuclear.

Tabla 2.2. Propiedades del combustible nuclear

Propiedades	Temperatura Superficial 340 °C
Conductividad térmica	28.2 [$\frac{W}{m \cdot ^\circ K}$]
Calor específico	431 [$\frac{J}{kg \cdot ^\circ K}$]
Densidad	6940 [$\frac{kg}{m^3}$]
Diámetro	15 [mm]
Vida útil del combustible	25 meses
Absorbente de neutrones	Boro
Potencia por esfera	134.40 [W]

(Fuente: Sefidvash F., 2016)

La cantidad de material nuclear que estará en funcionamiento continuo dentro del reactor borda las 1620000 esferas, lo suficiente para generar algunas dificultades en la introducción de parámetros fundamentales para la simulación con el software COMSOL Multiphysic, estas son:

- Excesivo tiempo de introducción de coordenadas x, y, z por cada esfera en formato CAD de COMSOL Multiphysic.
- Altos recursos computacionales y tiempo de simulación, alrededor de 13 días de trabajo continuo
- Altos números de iteraciones y porcentajes de error de convergencia mientras más elementos se añadan al núcleo del reactor
- Pequeño diámetro del material nuclear en comparación al lecho del reactor
- Alta generación de grados de libertad y en consecuencia gran número de resolución de ecuaciones diferencias parciales (EDPs)

Las limitaciones mostradas pueden ser resueltas por el método semiempírico, el cual parte de la base de la derivación de relaciones empíricas, aquí la transferencia de calor de un lecho de esferas, por ejemplo, puede ser analizado como la transferencia de calor para una sola esfera (Achenbach E., 1995).

$$V_{Eeq} = n * V_{Er} \quad (\text{Ec. 2.1})$$

Donde:

V_{Eeq} = Volumen de la esfera equivalente, [m^3]

V_{Er} = Volumen de la esfera real, [m^3]

n = Número de esferas

$$P_{eq} = n * P_r \quad (\text{Ec. 2.2})$$

Donde:

P_{eq} = Potencia equivalente, [W]

P_r = Potencia real, [W]

n = Número de esferas

Para comprobar esta teoría se considera una esfera equivalente de radio de 0,05 [m], utilizando la Ec. 2.1 se tiene.

$$\begin{aligned} \frac{4}{3}\pi r_{eq}^3 &= n \frac{4}{3}\pi r_r^3 \\ 0.05^3 &= n \left(\frac{0.015}{2}\right)^3 \\ n &= 296.4 \cong 297 \end{aligned}$$

Una esfera equivalente representa 297 esferas reales, las propiedades físicas y químicas se mantienen, no siendo así para la potencia que estas emiten. La potencia equivalente se calcula con la Ec. 2.2.

$$P_{eq} = 297 * 134.4[W]$$

$$P_{eq} = 39916.8 [W]$$

Una simulación previa muestra los resultados obtenidos en la Figura 2.4. Claramente se observa que las variaciones de temperatura son pequeñas, las modificaciones geométricas son perceptibles pero no influyen en la transferencia de calor de las esferas, comprobando así que el método semiempírico es viable para lechos empacados.

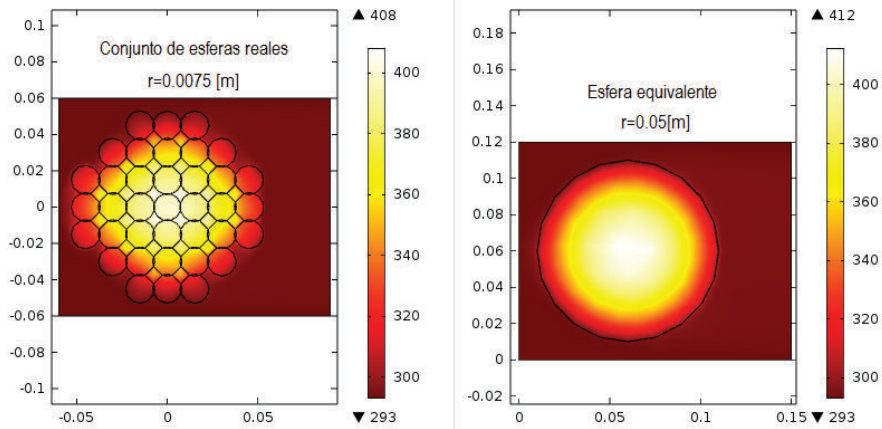


Figura 2.4. Esfera equivalente
(Fuente: Propia)

Las propiedades de la esfera equivalente se muestran en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Propiedades de la esfera equivalente

Propiedades	Temperatura Superficial 340 °C
Conductividad térmica	28.2 [$\frac{W}{m \cdot ^\circ K}$]
Calor específico	431 [$\frac{J}{kg \cdot ^\circ K}$]
Densidad	6940 [$\frac{kg}{m^3}$]
Diámetro	0.10 [m]
Vida útil del combustible	25 meses
Absorbente de neutrones	Boro
Potencia por esfera	39916.8 [W]

(Fuente: Sefidvash F., 2016)

2.1.3. Arreglo del material nuclear

El combustible nuclear de forma esférica posee generación interna de calor, el cual es transferido al fluido. El arreglo interno del material nuclear puede presentarse de dos formas:

- Arreglo BCC
- Arreglo FCC

Se analizará y se determinará cual de los dos arreglos es el más viable y factible para la construcción del lecho del reactor.

2.1.4. Condiciones iniciales para la simulación

COMSOL MultiPhysics trabaja con condiciones iniciales para la resolución de las Ecuaciones Diferenciales Parciales que se generan internamente. Las condiciones pueden ser modificables pero deben ser coherentes con los datos que se esperan obtener. Los parámetros que deben tener valores definidos son:

- Temperatura ambiente.
- Temperatura del fluido a la entrada al lecho.
- Velocidad de entrada del flujo.
- Presión de entrada.

Tabla 2.4. Condiciones iniciales para diferentes velocidades del fluido

Item	Velocidad del Fluido [m/s]			
	0.40	0.60	0.80	1.0
T. amb [$^{\circ}K$]	298.0	298.0	298.0	298.0
T. ent [$^{\circ}K$]	563.0	563.0	563.0	563.0
P. ent [MPa]	16.0	16.0	16.0	16.0

(Fuente: Propia)

La Tabla 2.4 muestra los valores de las condiciones iniciales las mismas que no dependen de la forma de arreglo del material nuclear. Los valores presentados servirán para todas las corridas de simulación, variando sólo la velocidad de ingreso del fluido. Determinar cual es la velocidad idónea para el diseño del lecho del reactor es uno de los objetivos a alcanzar.

2.1.5. Consideraciones para la simulación

Para evitar dificultades de la no convergencia de valores iniciales, mallados indefinidos o tiempo de simulación muy elevados, al momento de programar la simulación del lecho del reactor se debe considerar:

- Estudio de simulación en estado estacionario.
- Estudio multifísico sólido líquido.
- Fluido en estado laminar alrededor del lecho.
- Creación de mallado normal para todos los elementos del reactor.

- Materiales utilizados extraídos de la librería del software.
- Geometría CAD 3D creada en con las herramientas del software.

2.1.6. Creación del modelo de simulación en 3D

El modelo 3D de simulación se hará utilizando la interfaz CAD propia del software, el estudio multifísico se hace aprovechando los diferentes paquetes de análisis que COMSOL dispone para los estudios, Figura 2.5, Anexo A.

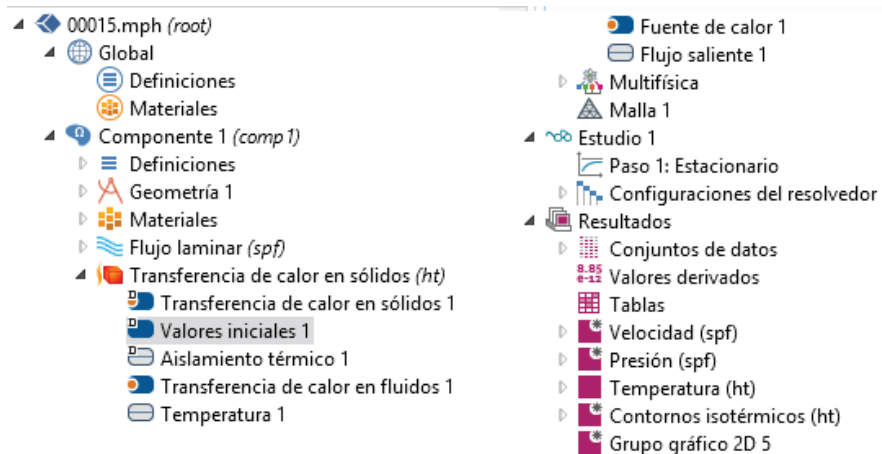


Figura 2.5. Árbol de simulación
(Fuente: Propia)

2.1.7. Resultados obtenidos de la simulación

Los resultados que COMSOL proporciona son de tipo multimedia los mismos que pueden ser gráficos de estado físico y curvas, estos últimos pueden ser exportados en formato `txt` para posteriormente ser analizados a detalle. Anexo B.

Durante la realización de la Tabla 2.4 se observó que el único parámetro que varía para cada corrida de simulación era la velocidad del fluido la misma que tiene los siguientes valores:

- Velocidad de 0.4 [m/s]
- Velocidad de 0.6 [m/s]
- Velocidad de 0.8 [m/s]

- Velocidad de 1 [m/s]

Las próximas secciones hacen uso de estos valores para poder obtener los perfiles de temperatura y presión del lecho del reactor, para posteriormente ser analizados en el capítulo III.

2.1.8. Resultados de simulación arreglo FCC, velocidad de fluido de 0.4 (m/s)

Las Figuras 2.6, 2.7, 2.8 muestran el estado físico de: temperatura, presión y velocidad del fluido para una distribución de esferas del tipo FCC. Es importante tener en cuenta que en la Tabla 2.5 se presenta algunas características técnicas como: el tiempo de simulación, modelo, nodos y cantidad de esferas. Las simulaciones para las demás velocidades del fluido rondan estos valores así se observa en el Anexo C.

Tabla 2.5. Características técnicas de la simulación, FCC 0.4 [m/s]

Ítem	Propiedades
Modelo	FCC 0.4.mph COMSOL 5.0.0.243
Nodos	1200
Tiempo de estudio	38 h, 43 min, 23 s
Cantidad de esferas	342

(Fuente: Propia)

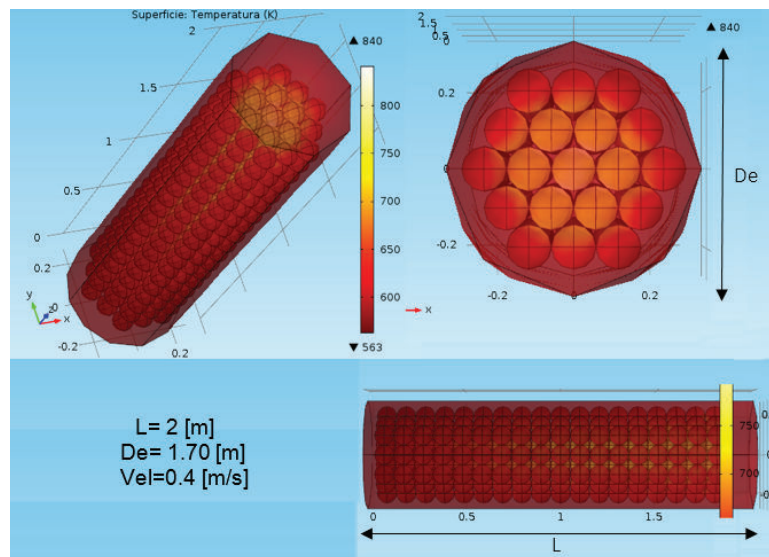


Figura 2.6. Temperatura
(Fuente: Propia)

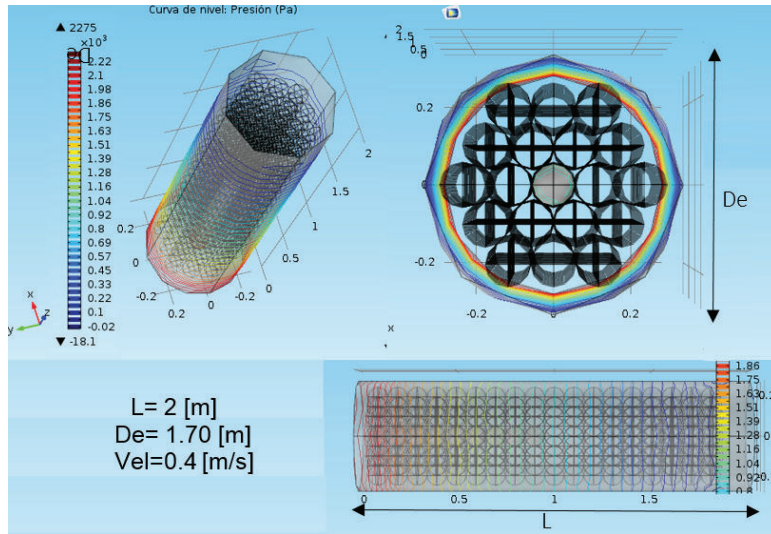


Figura 2.7. Presión
(Fuente: Propia)

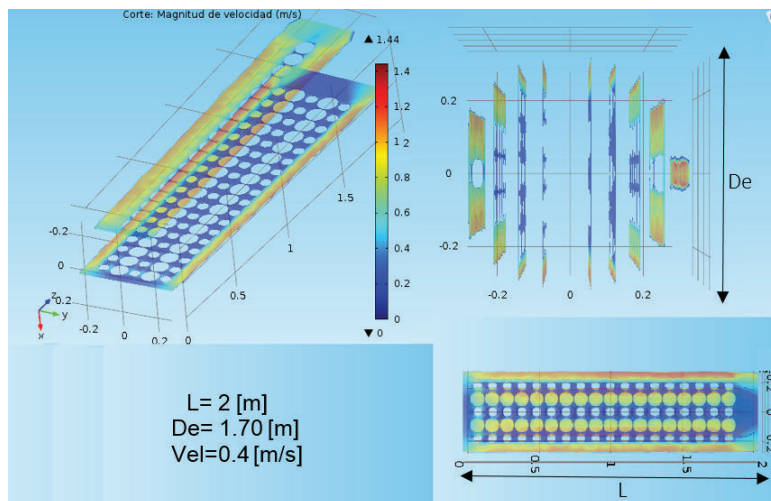


Figura 2.8. Velocidad
(Fuente: Propia)

2.1.9. Curvas de la simulación para FCC a diferentes velocidades del fluido: 0.4, 0.6, 0.8 y 1 (m/s)

Los datos proporcionados por COMSOL han sido transformados a formato `txt` los mismos que con la ayuda del software **R** han sido analizados, obteniendo así los diferentes tipos de curvas, Anexo D.

Estos perfiles son parte fundamental del estudio ya que con estos valores se podrá determinar si el material nuclear no sobrepasa la temperatura límite de diseño o si el líquido refrigerante alcanza la temperatura deseada para su posterior tratamiento o que los datos de presión determinados son los óptimos para el funcionamiento de las bombas de seguridad en caso de emergencia. Los perfiles obtenidos se clasifican en:

- Perfil de temperatura de fluido.
- Perfil de temperatura de las esferas a lo largo del lecho fijo.
- Perfil de presiones.

El estudio, interpretación y análisis de la base de datos recolectado de todas las corridas de simulación se verá en el Capítulo III. Los datos obtenidos de COMSOL serán comparados con los datos obtenidos del modelado matemático los mismos que se visualizan en las siguientes secciones.

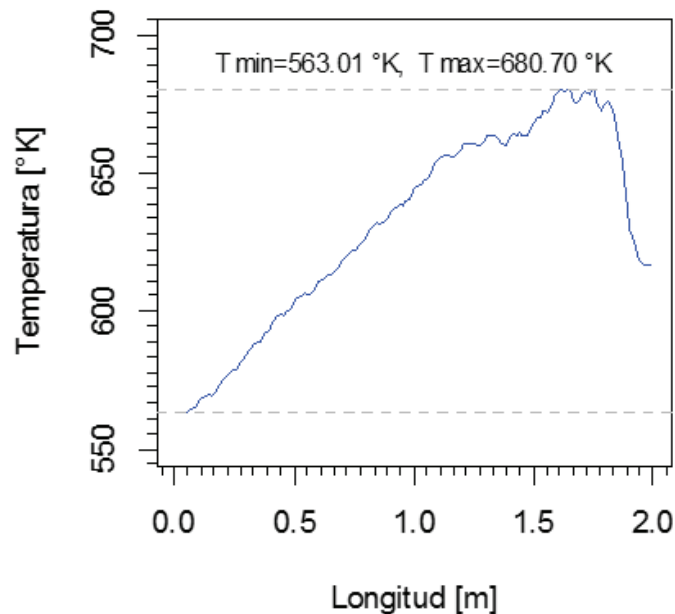


Figura 2.9. Perfil de temperatura del fluido simulado, arreglo FCC, velocidad 0.4 [m/s]
(Fuente: Propia)

Las Figuras: 2.9, 2.12, 2.15 y 2.18 corresponden al perfil de temperatura del fluido, se aprecia el incremento de temperatura debido a la extracción del calor generado por el material nuclear en forma de esferas.

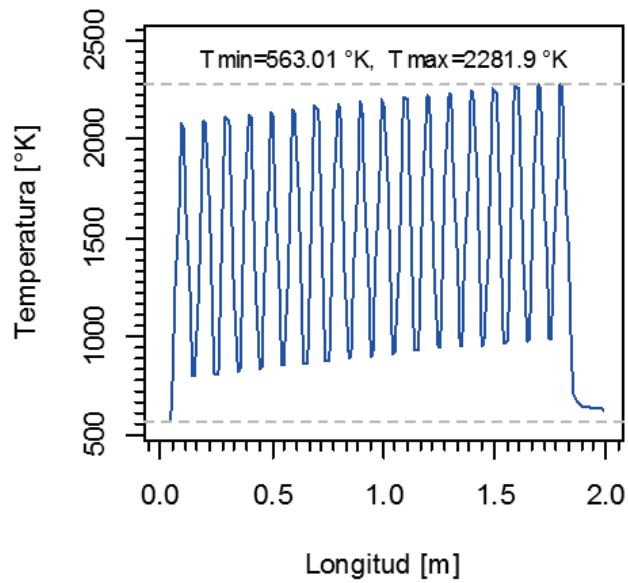


Figura 2.10. Perfil de temperatura de las esferas simulado, arreglo FCC, velocidad 0.4 [m/s]
(Fuente: Propia)

Las Figuras: 2.10, 2.13, 2.16 y 2.19, proporcionan los límites de temperatura de trabajo de las esferas una vez que el reactor alcanza el estado termo estable. Estos valores varían de acuerdo a la velocidad del fluido.

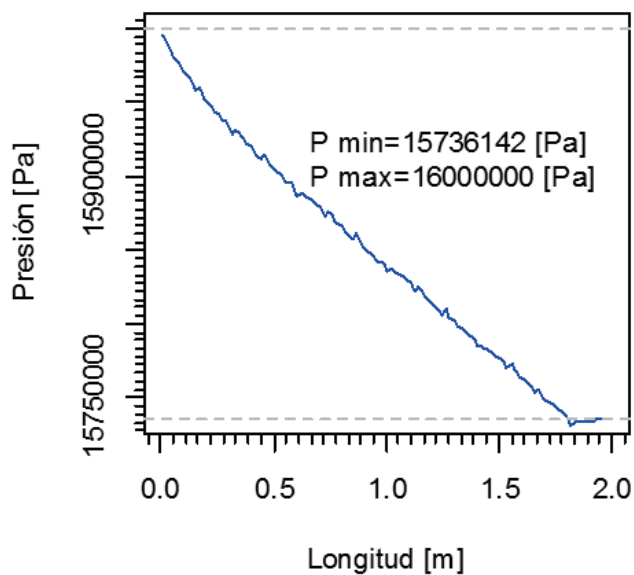


Figura 2.11. Perfil de presiones simulado, arreglo FCC, velocidad 0.4 [m/s]
(Fuente: Propia)

Las Figuras 2.11, 2.14, 2.17 y 2.20 muestran una pequeña caída de presión a lo largo del lecho del reactor debido a la interacción de sólido líquido en el espacio intersticial o porosidad del arreglo del material nuclear.

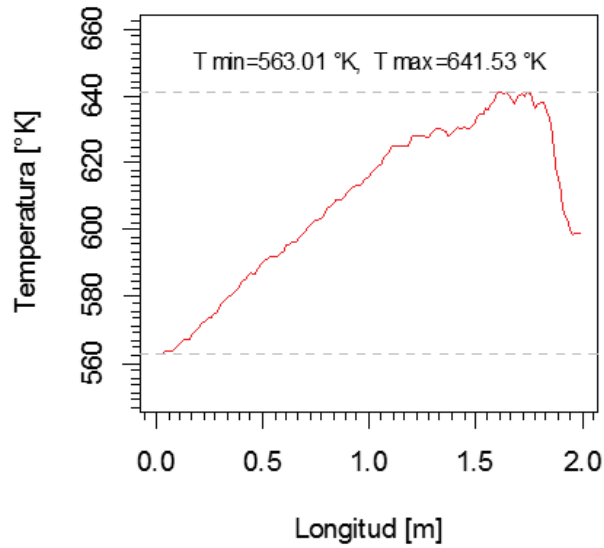


Figura 2.12. Perfil de temperatura del fluido simulado, arreglo FCC, velocidad 0.6 [m/s]
(Fuente: Propia)

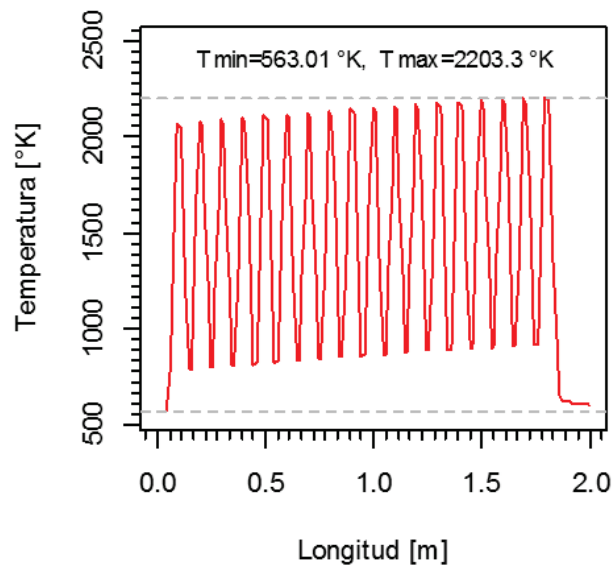


Figura 2.13. Perfil de temperatura de las esferas simulado, arreglo FCC, velocidad 0.6 [m/s]
(Fuente: Propia)

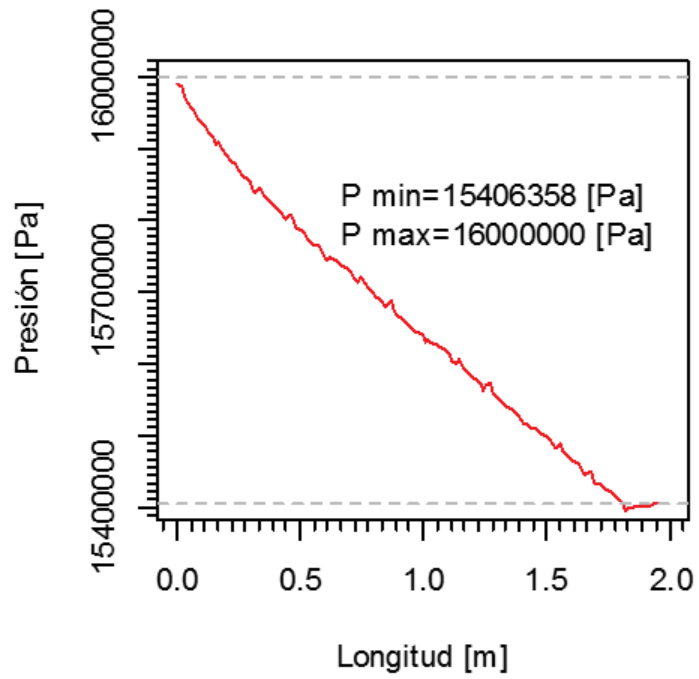


Figura 2.14. Perfil de presiones simulado, arreglo FCC, velocidad 0.6 [m/s]
 (Fuente: Propia)

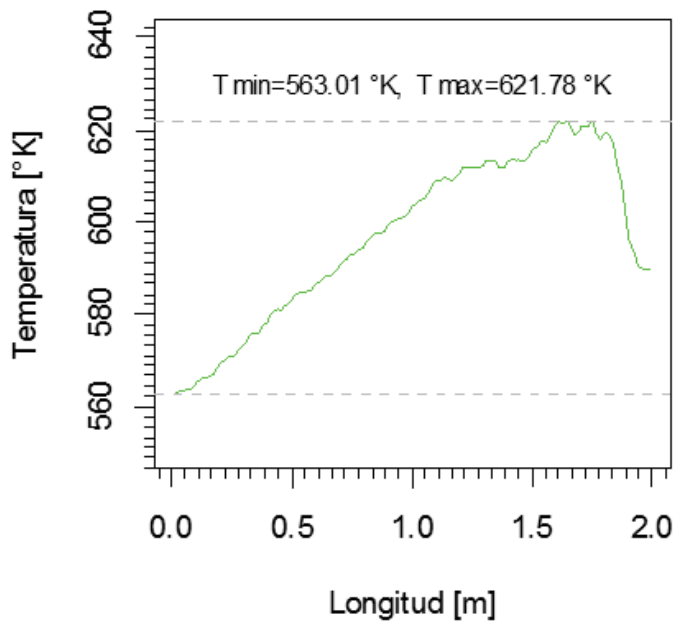


Figura 2.15. Perfil de temperatura del fluido simulado, arreglo FCC, velocidad 0.8 [m/s]
 (Fuente: Propia)

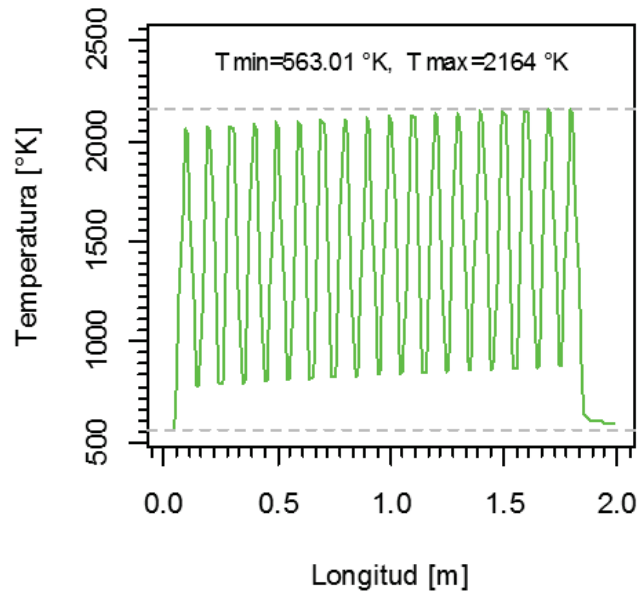


Figura 2.16. Perfil de temperatura de las esferas simulado, arreglo FCC, velocidad 0.8 [m/s]
(Fuente: Propia)

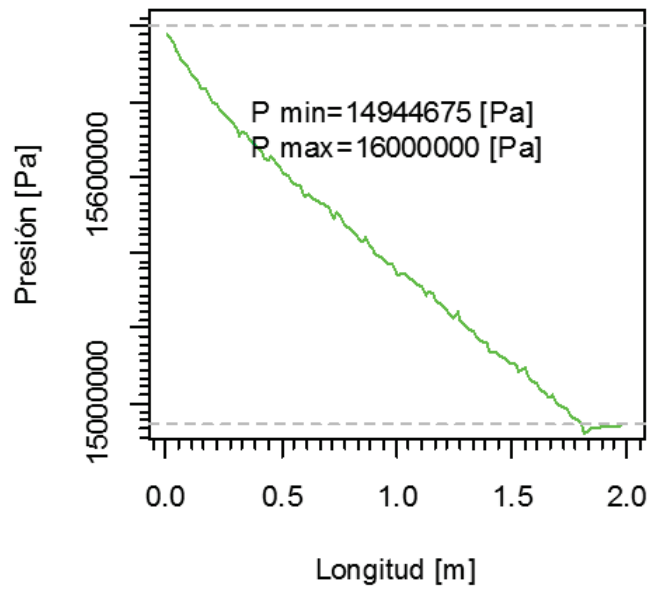


Figura 2.17. Perfil de presiones simulado, arreglo FCC, velocidad 0.8 [m/s]
(Fuente: Propia)

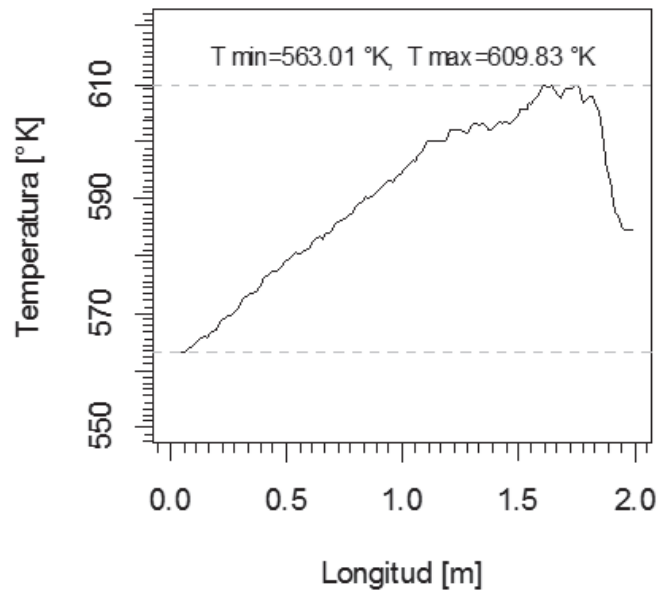


Figura 2.18. Perfil de temperatura del fluido simulado, arreglo FCC, velocidad 1 [m/s]
(Fuente: Propia)

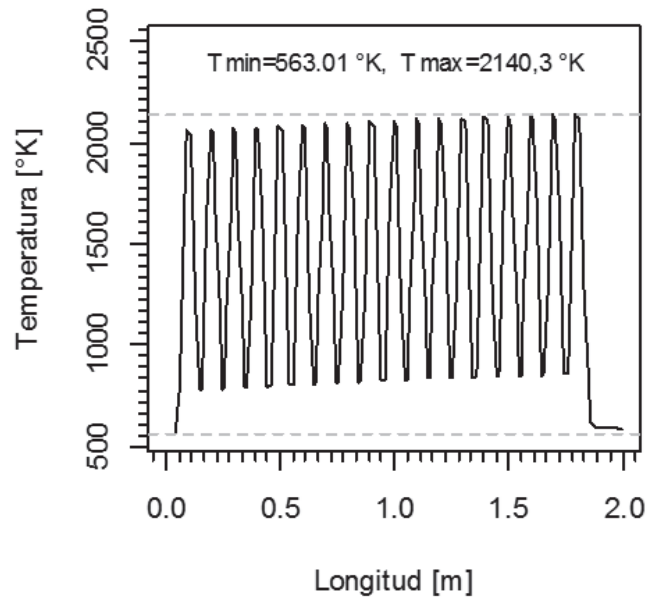


Figura 2.19. Perfil de temperatura de las esferas simulado, arreglo FCC, velocidad 1 [m/s]
(Fuente: Propia)

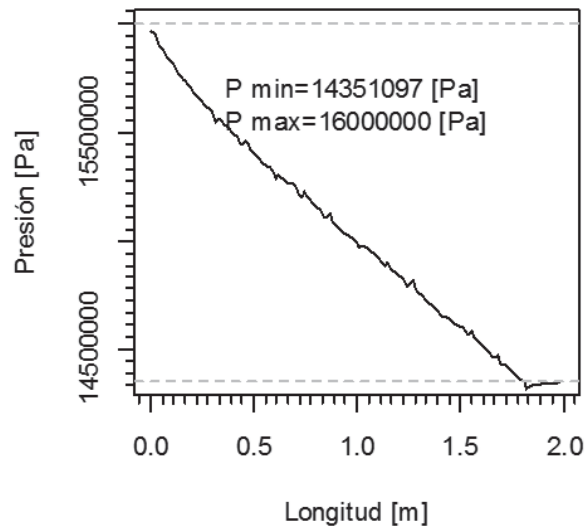


Figura 2.20. Perfil de presiones simulado, arreglo FCC, velocidad 1 [m/s]
(Fuente: Propia)

2.1.10. Curvas de la simulación para BCC a diferentes velocidades del fluido: 0.4, 0.6, 0.8 y 1 (m/s)

El estado físico para todas las corridas de simulados BCC se pueden apreciar en el Anexo E. Al igual que en la sección 2.1.8 se obtiene los tres perfiles importantes:

- Perfil de temperatura del fluido.
- Perfil de temperatura de las esferas a lo largo del lecho.
- Perfil de presiones.

La diferencia entre el arreglo FCC y BCC radica básicamente en la forma en que están ubicadas las esferas dentro del lecho del reactor. El arreglo BCC trae consigo algunos beneficios como por ejemplo un mejor control de estado de las esferas dentro del lecho, así como una menor caída de presión.

Las Figuras: 2.21, 2.24, 2.27 y 2.30 muestran el incremento de temperatura del fluido a lo largo del lecho del reactor nuclear. El aumento de temperatura se da hasta una longitud de 1.85 [m] luego de lo cual decrece debido a que el refrigerante deja de tener contacto con las esferas.

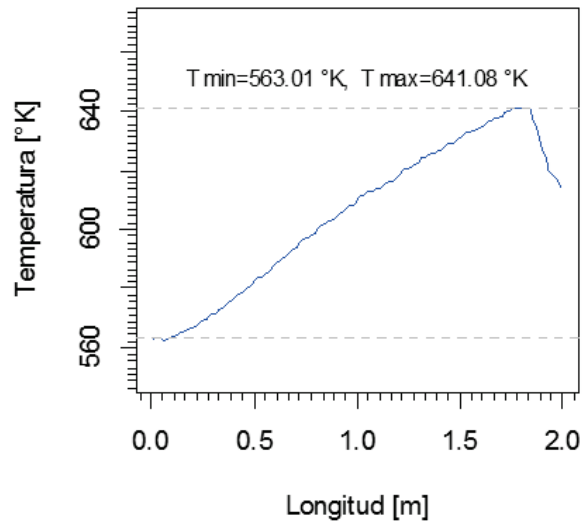


Figura 2.21. Perfil de temperatura del fluido simulado, arreglo BCC, velocidad 0.4 [m/s]
(Fuente: Propia)

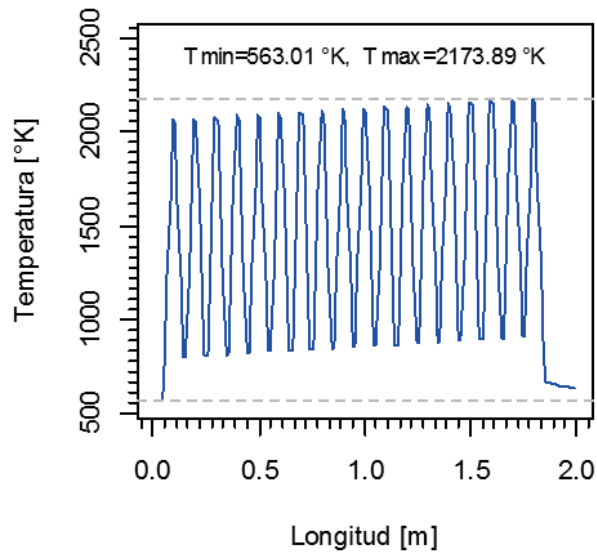


Figura 2.22. Perfil de temperatura de las esferas simulado, arreglo BCC, velocidad 0.4 [m/s]
(Fuente: Propia)

Las Figuras: 2.22, 2.25, 2.28 y 2.31 proporcionan los datos máximos de la temperatura alcanzada por las esferas cuando el flujo esta termo hidráulicamente desarrollado y en estado estable Las esferas del inicio del lecho son las que menor temperatura tienen.

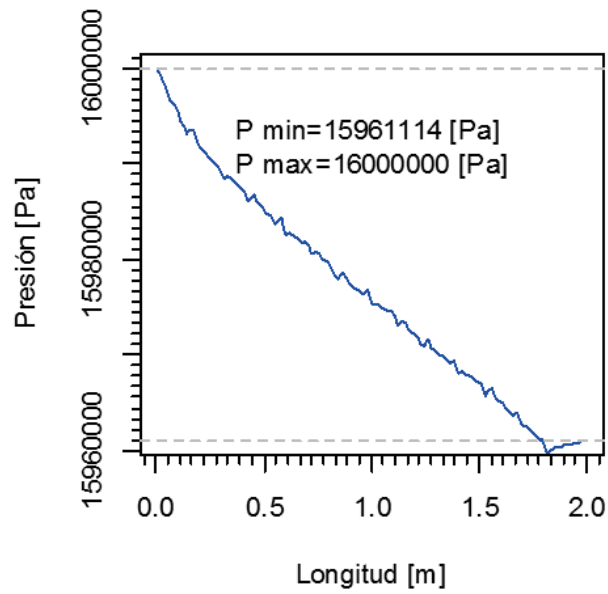


Figura 2.23. Perfil de presiones simulado, arreglo BCC, velocidad 0.4 [m/s]
(Fuente: Propia)

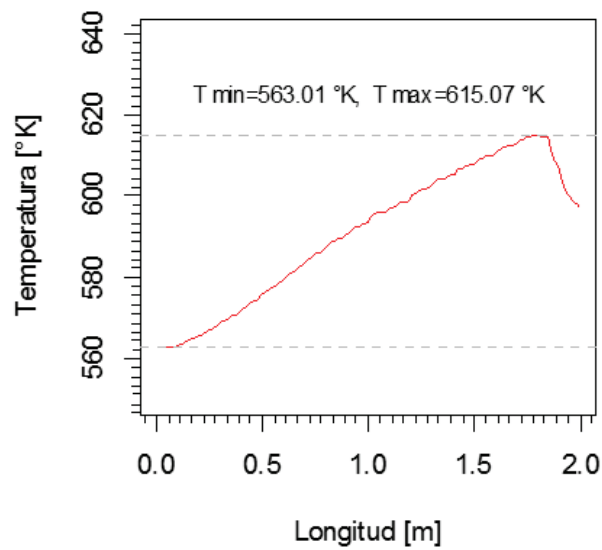


Figura 2.24. Perfil de temperatura del fluido simulado, arreglo BCC, velocidad 0.6 [m/s]
(Fuente: Propia)

Las Figuras 2.23, 2.26, 2.29 y 2.32 corresponden a la caída de presión que se da dentro del núcleo del reactor, estos valores son inferiores a los valores obtenidos en el arreglo FCC

debido a que el arreglo BCC es más poroso.

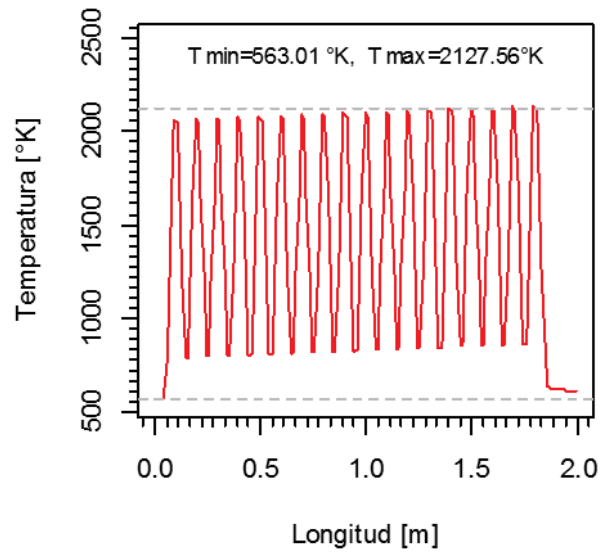


Figura 2.25. Perfil de temperatura de las esferas simulado, arreglo BCC, velocidad 0.6 [m/s]
(Fuente: Propia)

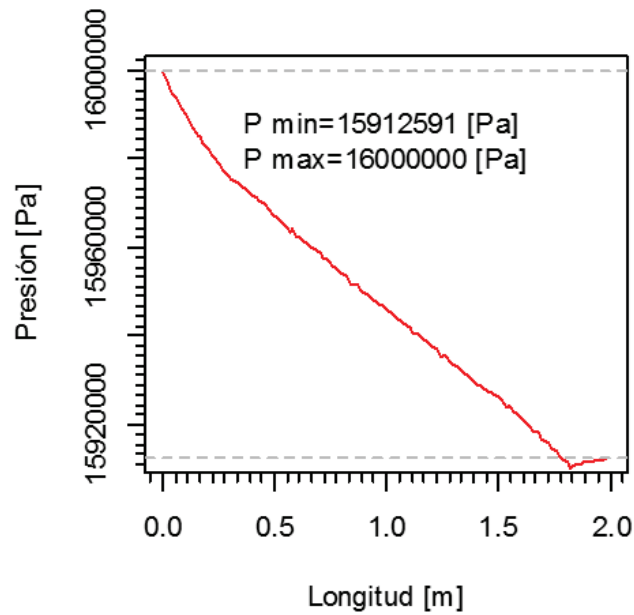


Figura 2.26. Perfil de presiones simulado, arreglo BCC, velocidad 0.6 [m/s]
(Fuente: Propia)

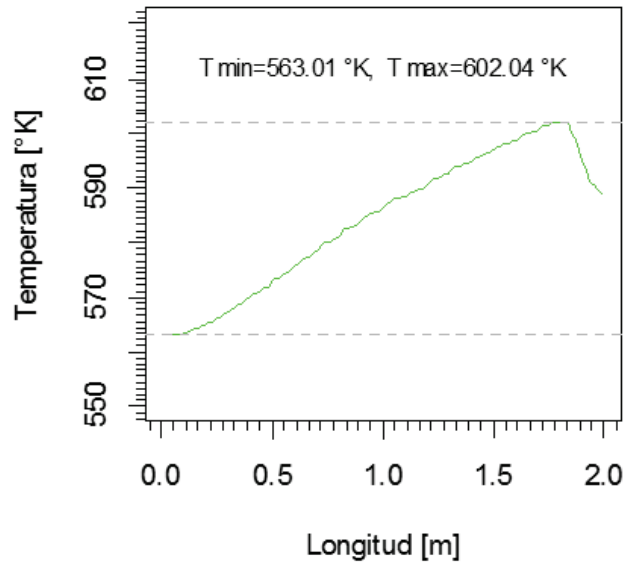


Figura 2.27. Perfil de temperatura del fluido simulado, arreglo BCC, velocidad 0.8 [m/s]
(Fuente: Propia)

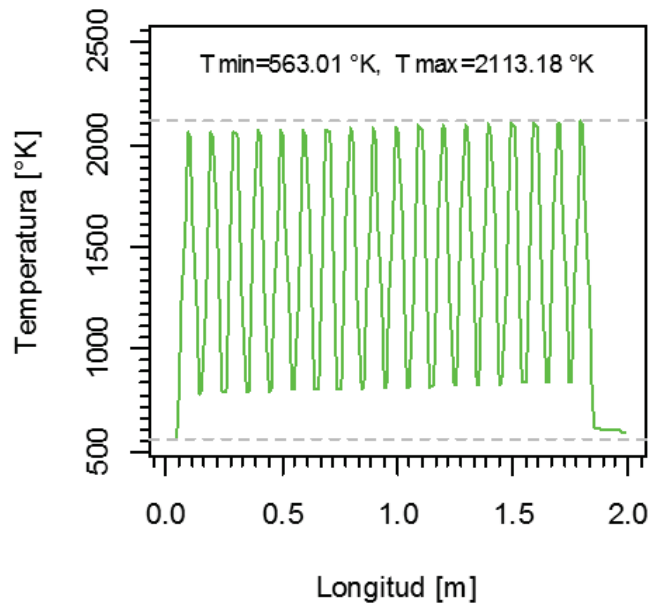


Figura 2.28. Perfil de temperatura de las esferas simulado, arreglo BCC, velocidad 0.8 [m/s]
(Fuente: Propia)

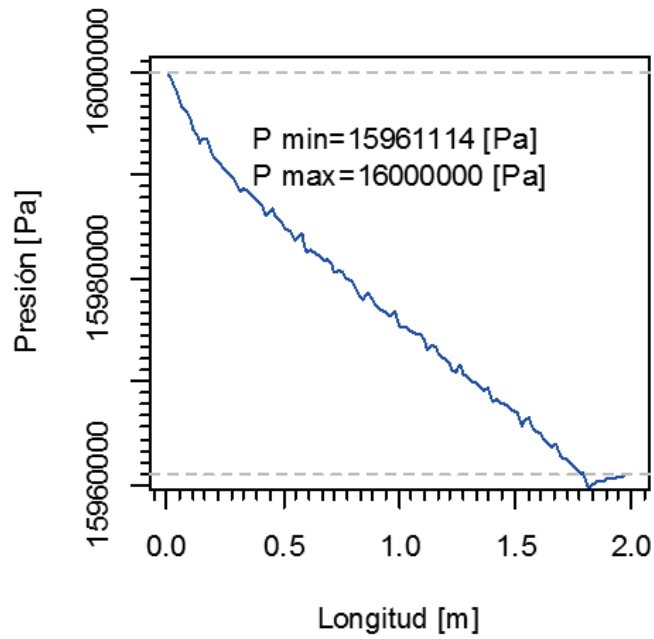


Figura 2.29. Perfil de presiones simulado, arreglo BCC, velocidad 0.8 [m/s]
(Fuente: Propia)

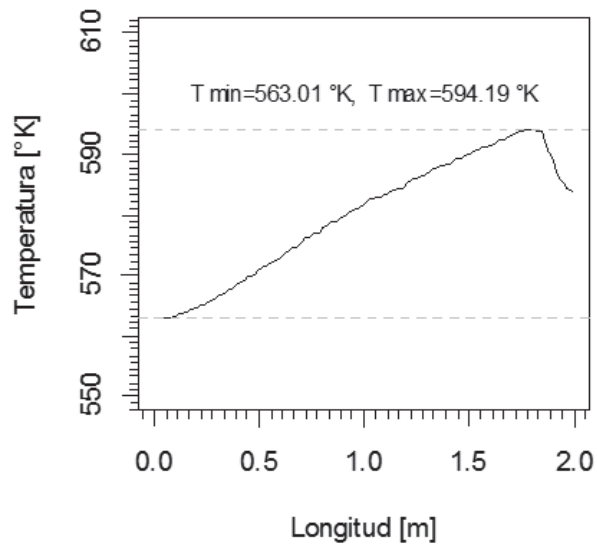


Figura 2.30. Perfil de temperatura del fluido simulado, arreglo BCC, velocidad 1 [m/s]
(Fuente: Propia)

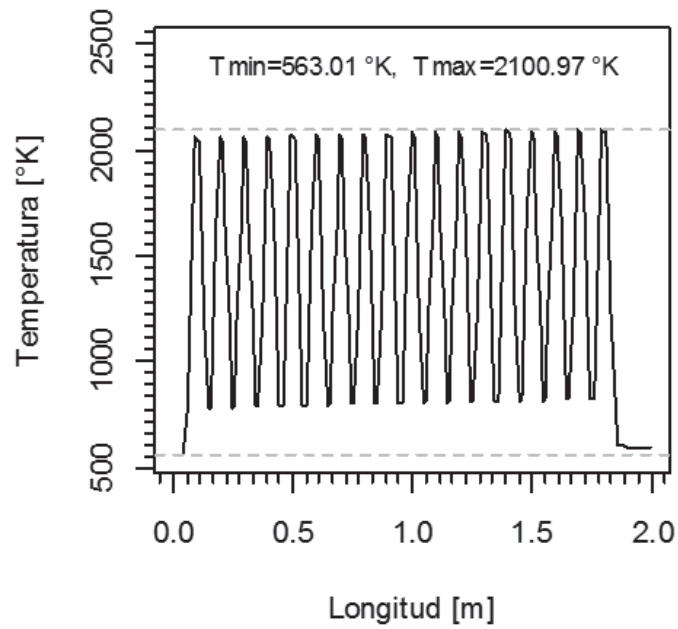


Figura 2.31. Perfil de temperatura de las esferas simulado, arreglo BCC, velocidad 1 [m/s]
(Fuente: Propia)

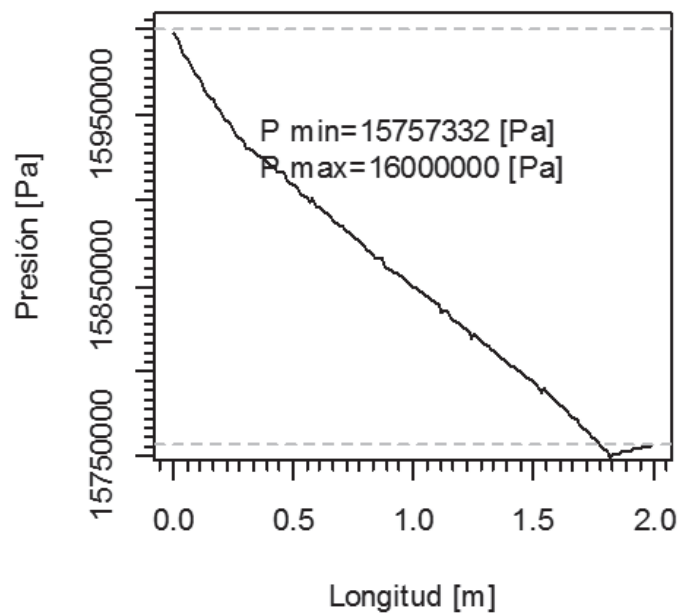


Figura 2.32. Perfil de presiones simulado, arreglo BCC, velocidad 1 [m/s]
(Fuente: Propia)

2.2. Modelado matemático del lecho fijo del reactor nuclear FBNR

2.2.1. Modelado de la transferencia de calor en el fluido refrigerante

Consideraciones para la transferencia de calor en el fluido refrigerante.

El fluido refrigerante circula dentro del lecho del reactor, manteniendo contacto con el combustible nuclear en forma de esferas. Para el análisis de la transferencia de calor en el fluido refrigerante que a traviesa el lecho, la Figura 2.33 muestra un esquema del núcleo del reactor FBNR.

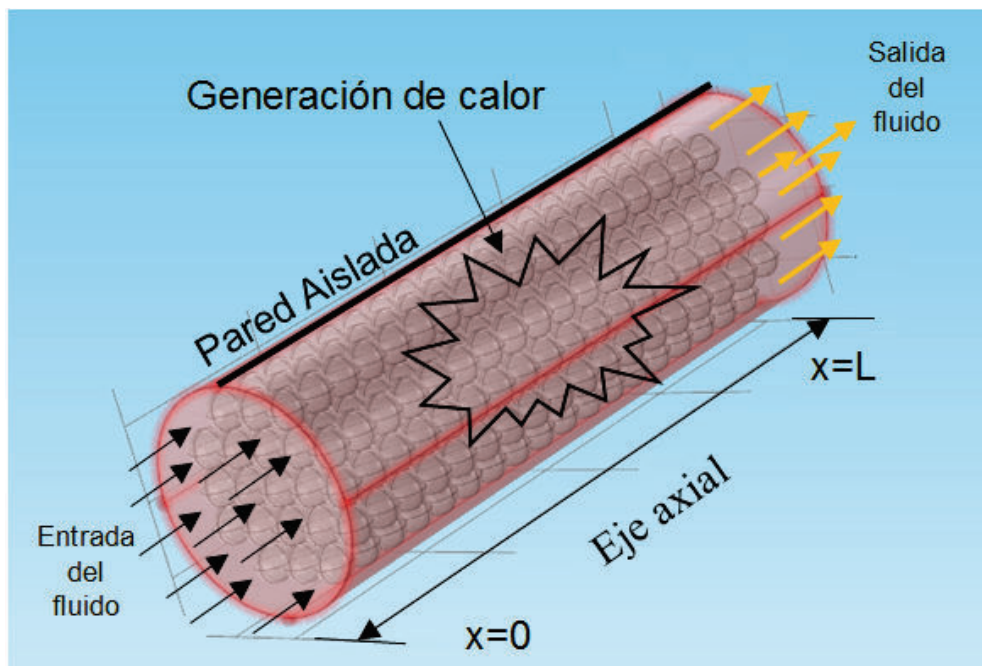


Figura 2.33. Esquema transferencia de calor en el fluido refrigerante
(Fuente: Propia)

Para establecer el modelado matemático de la transferencia de calor en el fluido refrigerante, se debe considerar:

- Estudio en estado estacionario.
- Transferencia de calor en dirección axial, se desprecia la transferencia de calor en dirección radial.

- Las propiedades termo-físicas de los materiales involucrados permanecen constantes.
- Generación de calor uniforme en las esferas de combustible que conforman el lecho del reactor.
- El fluido refrigerante es agua.
- La convección forzada constituye el proceso convectivo principal, se desprecia la convección natural en las paredes externas del cilindro que abarca al lecho.
- Fluido refrigerante incompresible.
- Paso del fluido refrigerante en el lecho considerado como flujo tapón.
- Fluido termo hidráulicamente desarrollado y constante en todo el intervalo de tiempo.

En lo que respecta a valores de porosidad para las distintas configuraciones del lecho se toman valores bibliográficos, estos se muestran en la Tabla 2.6

Tabla 2.6. Valores de porosidad

Arreglo	Porosidad
BCC	0.4
FCC	0.23

(Fuente: Catton I., 2012)

Considerando una presión de diseño del lecho de 16 [MPa] y una temperatura de entrada de 290 [°C] el fluido refrigerante se encuentra en estado líquido, las propiedades termo físicas del agua a dichas condiciones de presión y temperatura se presentan en la Tabla 2.7.

Tabla 2.7. Propiedades termo físicas del agua

Propiedades	Temperatura 290 °C
Conductividad Térmica	0.5812 [$\frac{W}{m \cdot ^\circ K}$]
Calor Específico	5230.12 [$\frac{J}{kg \cdot ^\circ K}$]
Densidad	746 [$\frac{kg}{m^3}$]
Viscosidad Dinámica	9.26*10 ⁻⁵ [Pa * s]

(Fuente: Spang A., 2016)

Las propiedades termo físicas del combustible nuclear se detallaron en la Tabla 2.3, estos valores sirven para la creación del modelo matemático.

2.2.2. Modelo propuesto para la transferencia de calor en el fluido refrigerante

En el estado estacionario toda la energía generada en las esferas de combustible es transferida a la fase líquida, es decir al fluido refrigerante que circula por el lecho, bajo la suposición de que las pérdidas laterales, debidas a la convección natural en las paredes del cilindro que rodea al lecho son despreciables, es posible realizar un balance de energía en el cual la generación de calor en el lecho es igual al calor sensible ganado por el fluido refrigerante como se muestra en la Ec. 2.3, es decir el calor ganado por el fluido permite a éste aumentar su temperatura sin cambiar su estado de agregación (Catton I., 2012).

$$Q''' V_s = \dot{m}_f C_{p_f} \Delta T_f \quad (\text{Ec. 2.3})$$

Donde:

Q''' = Generación volumétrica de calor, $\left[\frac{W}{m^3}\right]$

V_s = Volumen del sólido, $[m^3]$

\dot{m}_f = Flujo másico del fluido, $\left[\frac{kg}{s}\right]$

C_{p_f} = Calor específico del fluido, $\left[\frac{J}{kg \cdot ^\circ K}\right]$

ΔT_f = Variación de la temperatura del fluido refrigerante, $[^\circ K]$

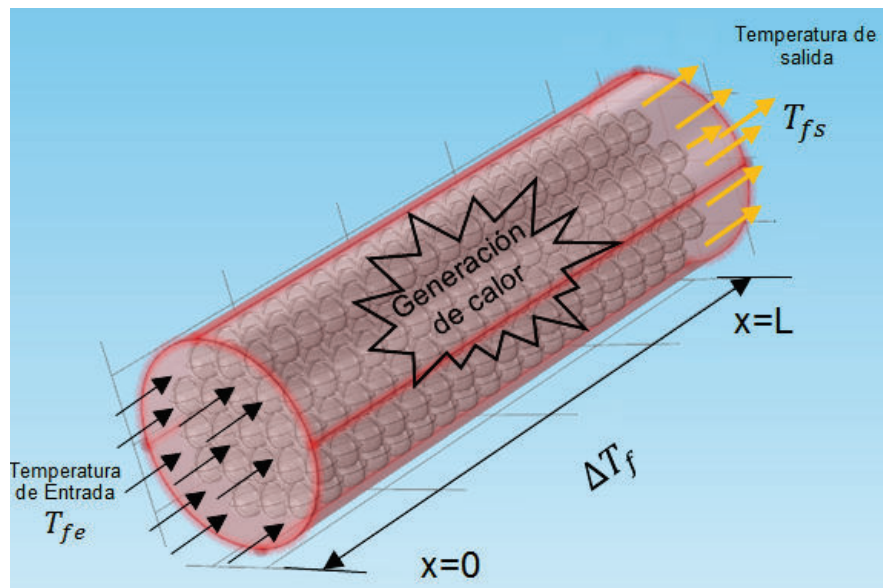


Figura 2.34. Esquema balance de energía del fluido refrigerante
(Fuente: Propia)

En la Figura 2.34 se puede observar el esquema del lecho del reactor nuclear FBNR para

realizar el balance de energía, en él se identifican las temperaturas de entrada y de salida del fluido.

Para encontrar la potencia generada por el lecho del reactor se usa la Ec. 2.4, en la cual el valor del producto de la generación volumétrica de calor y el volumen del sólido, es igual a la potencia equivalente del lecho (Corace J., 2009).

$$P_{eqL} = n * P_r = Q'''V_s \quad (\text{Ec. 2.4})$$

Donde:

$$\begin{aligned} n &= \text{Número de esferas en el lecho} \\ P_{eqL} &= \text{Potencia equivalente del lecho, [W]} \\ P_r &= \text{Potencia real de la esfera equivalente, [W]} \end{aligned}$$

El flujo másico del fluido refrigerante se determina mediante la Ec. 2.5, se debe tener en cuenta que la velocidad superficial se mantiene constante en la dirección radial, teniendo variación sólo en el área transversal (Kim M., 2009).

$$\dot{m}_f = v_s * A_i * \rho \quad (\text{Ec. 2.5})$$

Donde:

$$\begin{aligned} \dot{m}_f &= \text{Flujo másico del fluido, } \left[\frac{kg}{s} \right] \\ v_s &= \text{Velocidad superficial del fluido, } \left[\frac{m}{s} \right] \\ A_i &= \text{Área intersticial del lecho, } [m^2] \\ \rho &= \text{Densidad del fluido refrigerante a } 290 \text{ } ^\circ C, \left[\frac{kg}{m^3} \right] \end{aligned}$$

El área intersticial del lecho, corresponde a el área libre de paso del fluido en el lecho, se calcula como el producto entre el área total del lecho y la porosidad como lo describe la Ec. 2.6 (Kim M., 2009).

$$A_i = \varepsilon * A_t \quad (\text{Ec. 2.6})$$

Donde:

$$\begin{aligned} A_i &= \text{Área intersticial del lecho, } [m^2] \\ \varepsilon &= \text{Porosidad del lecho} \end{aligned}$$

$A_t = \text{Área total del lecho calculada con el valor del radio mínimo, [m}^2]$

La Figura 2.35 da una mejor visualización del área intersticial, la cual está representada con color negro.

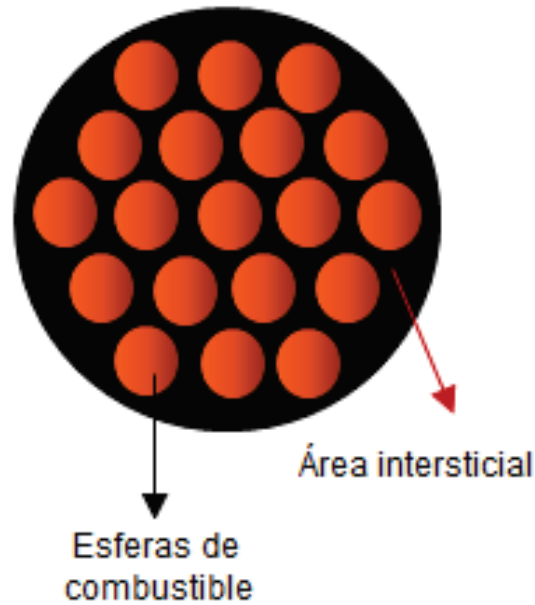


Figura 2.35. Representación área intersticial
(Fuente: Propia)

Debido a que el modelado matemático debe realizarse con diferentes velocidades y tipos de arreglo se muestra un ejemplo de cálculo para la temperatura de salida del fluido en el lecho que presenta un arreglo BCC con una velocidad de fluido de $0.6 \left[\frac{m}{s} \right]$.

La potencia equivalente del lecho se calcula utilizando la Ec. 2.4, el número de esferas para el arreglo BCC es 378 y la potencia real de la esfera equivalente es 39916.8 [W].

$$P_{eqL} = 378 * 39916.8[W]$$

$$P_{eqL} = 15088550[W]$$

El área total del lecho se determina mediante la Ec. 2.7 (Bibb S., 2003). El radio mínimo es igual a $0.3 [m]$.

$$A_t = \pi * r_t^2 \tag{Ec. 2.7}$$

Donde:

$$r_l = \text{Radio m\u00ednimo del lecho, [m]}$$

Remplazando el valor del radio m\u00ednimo en la Ec. 2.7 se obtiene el \u00e1rea total del lecho.

$$A_t = \pi * 0.3^2 [m^2]$$

$$A_t = 0.283 [m^2]$$

Al sustituir el valor del \u00e1rea total del lecho y el valor de la porosidad correspondiente al arreglo BCC (0,4), en la Ec. 2.6 el \u00e1rea intersticial del lecho es igual a:

$$A_i = 0.4 * 0.283 [m^2]$$

$$A_i = 0.113 [m^2]$$

El valor del flujo m\u00e1sico es calculado con la Ec. 2.5, donde:

$$v_s = 0.6 \left[\frac{m}{s} \right]$$

$$A_i = 0.113 [m^2]$$

$$\rho = 746 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

$$\dot{m}_f = 0.6 \left[\frac{m}{s} \right] * 0.113 [m^2] * 746 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

$$\dot{m}_f = 50.60 \left[\frac{kg}{s} \right]$$

Despejando de la Ec. 2.3 la variaci\u00f3n de temperatura del fluido y remplazando los valores correspondientes a: flujo m\u00e1sico del fluido refrigerante obtenido en la Ec. 2.5 y el calor espec\u00edfico del agua a 290 \u00b0C se obtiene:

$$\Delta T_f = \left(\frac{15088550 [W]}{50.60 \left[\frac{kg}{s} \right] * 5230.12 \left[\frac{J}{kg \cdot ^\circ K} \right]} \right)$$

$$\Delta T_f = 57.0 [^\circ K]$$

La variaci\u00f3n de temperatura del fluido es igual a la diferencia entre la temperatura de salida del fluido refrigerante (T_{fs}) y la temperatura de entrada ($T_{fe} = 290^\circ C = 563^\circ K$).

$$\Delta T_f = T_{fs} - T_{fe}$$

$$57.0^\circ K + 563^\circ K = T_{fs}$$

$$T_{fs} = 620^\circ K$$

La temperatura de salida del fluido refrigerante en un arreglo BCC del lecho fijo y una velocidad del fluido de $0.6 \left[\frac{m}{s} \right]$ es de $620^\circ K$.

En la Tabla 2.8 se detallan los valores de temperatura de salida del fluido refrigerante para cada configuración del lecho y velocidad de fluido respectiva.

Tabla 2.8. Temperatura de salida fluido refrigerante

Configuración	Velocidad del fluido [m/s]			
	0.4	0.6	0.8	1
BCC	$648.4^\circ K$	$620.1^\circ K$	$605.7^\circ K$	$597.2^\circ K$
FCC	$697.9^\circ K$	$652.6^\circ K$	$630.2^\circ K$	$616.8^\circ K$

(Fuente: Propia)

Para obtener el perfil de temperatura del fluido se consideró al paso del fluido refrigerante como flujo tapón en el cuál la velocidad y temperatura se mantienen constantes en el eje radial y se procede a dividir el lecho en el eje axial en secciones de $0.1 [m]$ de longitud.

Para calcular la temperatura de salida del fluido refrigerante de cada sección se realiza el procedimiento antes descrito para el cálculo de la temperatura de salida del lecho al considerar la potencia generada por cada sección.

Los valores de temperatura del perfil del fluido refrigerante para los distintos tipos de arreglo del lecho fijo y las velocidades del fluido se muestran en el Anexo F.

2.2.3. Presentación de resultados para el fluido refrigerante, arreglo FCC

En la Figura 2.36 se presenta el perfil de temperatura del fluido para diferentes velocidades del fluido: $0.4, 0.6, 0.8$ y $1 [m/s]$, se aprecia que a mayor velocidad del fluido refrigerante la temperatura de salida del fluido disminuye, además de que la temperatura del fluido y la longitud del lecho presentan una relación directamente proporcional, ya que la curva obtenida es una línea recta. El estudio y análisis de los datos aquí expuestos se realizarán en el Capítulo III.

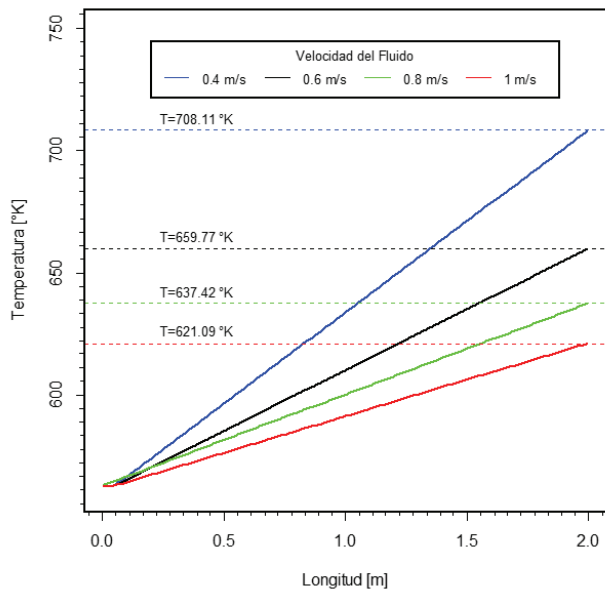


Figura 2.36. Perfil de temperatura del fluido, arreglo FCC, varias velocidades del fluido (Fuente: Propia)

2.2.4. Presentación de resultados para el fluido refrigerante, arreglo BCC

En la Figura 2.37 se expone el perfil de temperatura del fluido para diferentes velocidades del fluido: 0,4; 0,6; 0,8 y 1 [m/s], se aprecia un comportamiento similar al descrito para el arreglo FCC, la temperatura del fluido refrigerante varía linealmente con la longitud del lecho.

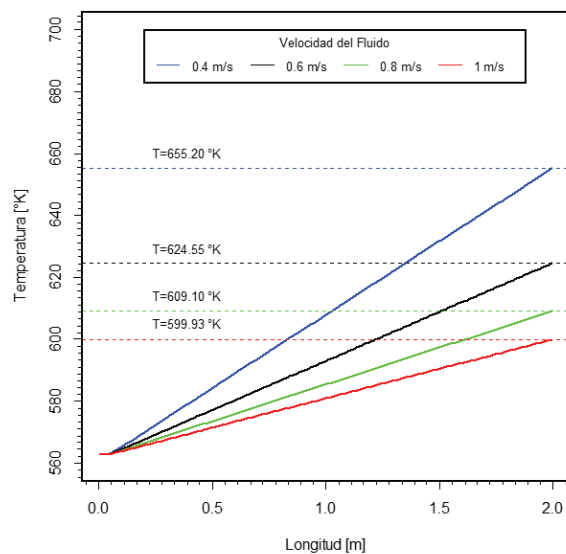


Figura 2.37. Perfil de temperatura del fluido, arreglo BCC, varias velocidades del fluido (Fuente: Propia)

2.2.5. Modelado de la transferencia de calor en el combustible nuclear

Consideraciones para la transferencia de calor en el combustible nuclear.

Se asume que la transferencia de calor en el eje radial es igual a la transferencia en el eje axial. Se considera que la transferencia de calor en el combustible nuclear se lleva a cabo en el eje axial, las consideraciones realizadas para el fluido refrigerante son válidas en este apartado.

Los mecanismos de transferencia de calor presentes en el análisis del combustible nuclear son conducción y convección, en la Figura 2.38 se presenta un esquema que muestra los tipos de mecanismos de transferencia de calor presentes en las esferas de combustible.



Figura 2.38. Mecanismos de transferencia de calor esfera combustible
(Fuente: Propia)

Al considerar la transferencia de calor en el eje radial igual al eje axial se extrae una pequeña sección de forma rectangular de la esfera; para determinar las temperaturas de pared, sus dimensiones se muestran en la Figura 2.39 (Achenbach E., 1995).

En sus extremos circula el fluido refrigerante a distintos valores de temperatura T_{f1} y T_{f2} y coeficientes de convección h_1 y h_2 como se ilustra en la Figura 2.40, los valores de la temperatura se obtienen de la simulación del perfil de temperatura del fluido. La esfera elegida para el análisis, constituye aquella que alcanza la mayor temperatura según la simulaciones realizadas.

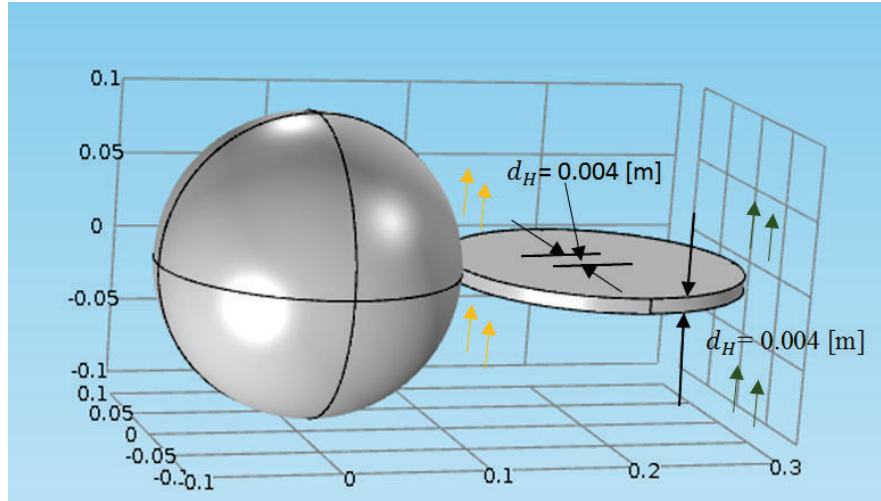


Figura 2.39. Consideración placa plana
(Fuente: Propia)

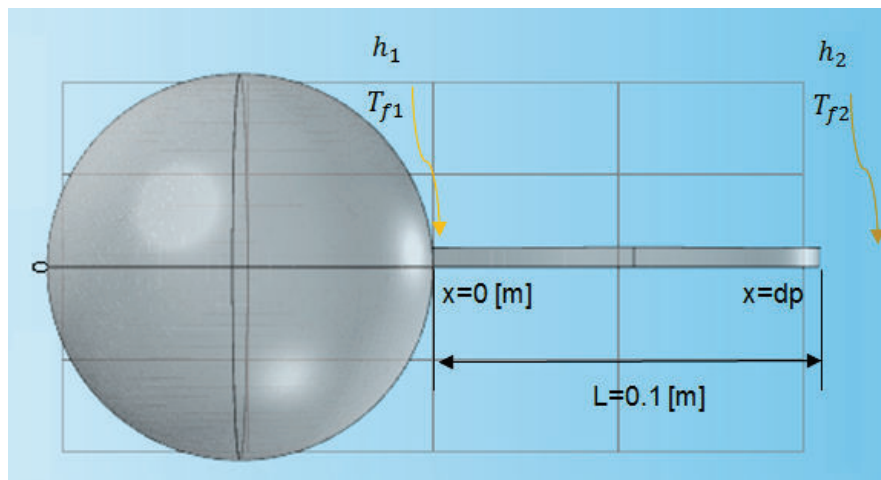


Figura 2.40. Consideración placa plana e identificación de temperaturas de fluido
(Fuente: Propia)

El modelo propuesto para determinar la temperatura de pared en una esfera de combustible se lo realiza en base a la ecuación de calor para una pared plana en estado estable y generación interna de energía, como se muestra en la ecuación Ec. 2.8 (Kreith F., 2012). El calor se transfiere unidimensionalmente en la dirección x positiva. La Figura 2.41. describe la sección de análisis considerada.

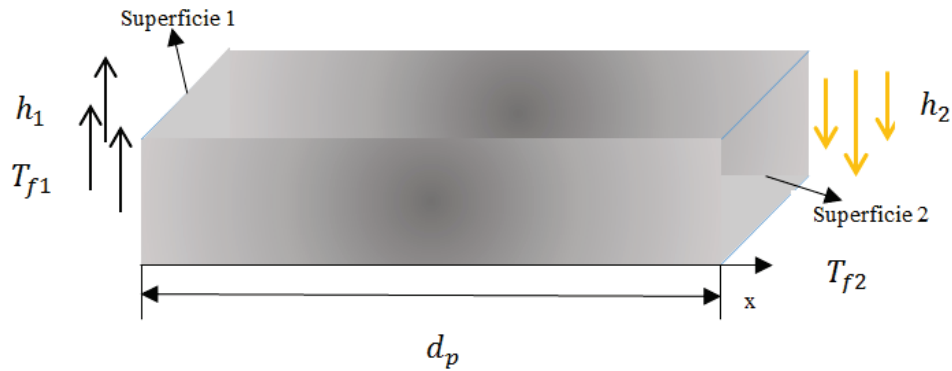


Figura 2.41. Balance de energía en las superficies
(Fuente: Propia)

Al plantear la ecuación de calor bajo las condiciones descritas se obtiene:

$$k_s \frac{d^2 T_w}{dx^2} + q''' = 0 \quad (\text{Ec. 2.8})$$

Donde:

k_s = Conductividad Térmica del sólido, $[\frac{W}{m^{\circ}K}]$

T_w = Temperatura de pared, $[^{\circ}K]$

q''' = Generación de calor de la esfera por unidad de volumen $[\frac{W}{m^3}]$

Al dividir los términos de la Ec. 2.8 para la conductividad de la esfera sólida k_s se obtiene:

$$\frac{d^2 T_w}{dx^2} + \frac{q'''}{k_s} = 0$$

De la Ec. 2.8 al separar variables e integrar se obtiene la Ec. 2.9, la cual describe la solución general de la Ecuación Diferencial Parcial Ec. 2.8 y la Ec. 2.10 corresponde a la solución particular de la Ec. 2.8.

$$\frac{dT_w}{dx} = -\frac{q'''}{k_s}x + C_1 \quad (\text{Ec. 2.9})$$

$$T_w = -\frac{q'''}{2k_s}x^2 + C_1x + C_2 \quad (\text{Ec. 2.10})$$

Para encontrar la solución de la Ec. 2.8 se debe considerar lo siguiente:

- Balance de energía en las superficies.
- Condiciones de frontera.

Al considerar la sección de análisis como una pared plana se realiza el **balance de energía en las superficies**, estas se encuentran sometidas al paso de fluido refrigerante. El fluido refrigerante presenta distintas temperaturas para cada superficie y diferente coeficiente de convección como se ve en las Figuras 2.40 y 2.41.

Para la superficie 1 el balance de energía establece que el calor que se transmite en la placa por conducción es igual al calor ganado por el fluido refrigerante, en forma de calor de convección. Situación similar se presenta para la superficie 2 como se describe en la Figura 2.42.



Figura 2.42. Condiciones de frontera
(Fuente: Propia)

Las ecuaciones del balance de energía para la superficie 1 y 2 se muestran en las Ec. 2.11 y Ec. 2.12

$$-k_s \frac{dT_w}{dx} = h_1(T|_{x=0} - T_{f2}) \quad (\text{Ec. 2.11})$$

$$-k_s \frac{dT_w}{dx} = h_2(T_{f1} - T|_{x=\delta p}) \quad (\text{Ec. 2.12})$$

Para determinar la temperatura de pared de la placa y con ello la temperatura de pared de la esfera es necesario establecer condiciones de convección de superficie (Incropera F., 1999), en la Figura 2.42 se puede observar la identificación de las **condiciones de frontera** y sus temperaturas correspondientes.

Las condiciones de frontera para cada superficie se describen a continuación:

Condición de frontera, superficie 1, si $x = 0$,

$$-k_s \left. \frac{dT_w}{dx} \right|_{x=0} = h_1(T_{f1} - T_w|_{x=0}) \quad (\text{Ec. 2.13})$$

Evaluando la Ec. 2.10 cuando $x = 0$:

$$T_w|_{x=0} = C_2$$

Evaluando la Ec. 2.9 cuando $x = 0$ se obtiene que:

$$\left. \frac{dT_w}{dx} \right|_{x=0} = C_1$$

Remplazando los valores obtenidos en la Ec. 2.13

$$-k_s(C_1) = h_1(T_{f1} - C_2)$$

Condición de frontera, superficie 2, si $x = d_p$,

$$-k_s \left. \frac{dT_w}{dx} \right|_{x=d_p} = h_2(T_w|_{x=d_p} - T_{f2}) \quad (\text{Ec. 2.14})$$

Evaluando la Ec. 2.10 cuando $x = d_p$,

$$T_w|_{x=d_p} = -\frac{q'''}{2k_s}d_p^2 + C_1d_p + C_2$$

Evaluando la Ec. 2.9 cuando $x = d_p$, se obtiene:

$$\left. \frac{dT_w}{dx} \right|_{x=d_p} = -\frac{q'''}{k_s}d_p + C_1$$

Remplazando los valores obtenidos en la Ec. 2.14

$$-k_s\left(-\frac{q'''}{k_s}d_p + C_1\right) = h_2\left(-\frac{q'''}{2k_s}d_p + C_1d_p + C_2 - T_{f2}\right)$$

Las expresiones para determinar los valores de las constantes C_1 y C_2 y sus unidades correspondientes se muestran en las ecuaciones Ec. 2.15 y Ec. 2.16.

$$C_1 = \frac{-\frac{q'''}{h_2}d_p - \frac{q'''}{2k_s}d_p^2 + T_{f1} - T_{f2}}{\frac{-k_s}{h_2} - \frac{-k_s}{h_1} - d_p}, \left[\frac{^\circ K}{m} \right] \quad (\text{Ec. 2.15})$$

$$C_2 = \frac{k_s C_1}{h_1} + T_{f1}, [^\circ K] \quad (\text{Ec. 2.16})$$

Una vez determinadas las expresiones para el cálculo de las constantes, es necesario determinar el valor del coeficiente de convección (h_1 y h_2), los cuales se obtienen del número de Nusselt, el cual relaciona el valor del número de Reynolds y el número de Prandtl como se describió en la Ec. 1.8 en la sección 1.2.5.

El número de Reynolds (Re) para lechos presenta una variante fuera de las descritas en la sección 1.2.4 que se conoce con el nombre de Reynolds hidráulico (Re_h), la expresión matemática para su cálculo se indica en la ecuación Ec. 2.17 (Choque E., 2007).

$$Re_h = \frac{\rho v_s d_h}{\mu} \quad (\text{Ec. 2.17})$$

Donde: d_h = Diámetro Hidráulico

El diámetro Hidráulico se calcula como se muestra en la ecuación Ec. 2.18 (Catton I., 2012).

$$d_h = \frac{4\varepsilon}{S} \quad (\text{Ec. 2.18})$$

Donde S corresponde a el área superficial específica, la cual relaciona a la porosidad y al diámetro de partícula como se describe en la ecuación Ec. 2.19 (Catton I., 2012).

$$S = \frac{6(1 - \varepsilon)}{d_p} \quad (\text{Ec. 2.19})$$

Debido a que el modelado matemático debe realizarse para diferentes arreglos del combustible y diferentes velocidades del fluido refrigerante, a continuación se muestra un ejemplo de cálculo de la ecuación que describe a la temperatura de pared de una esfera para un arreglo del lecho del tipo BCC y una velocidad superficial de fluido de $0.6 [m/s]$. La sección seleccionada en el lecho para el análisis es $1.65 [m]$ y $1.74 [m]$ debido a que en esta sección se encuentra la esfera que alcanza un mayor valor de temperatura según la simulación realizada.

Se calculan los números de Reynolds a la temperatura del fluido $T_{f1} = 612.25^\circ K$ y $T_{f2} = 614.5021^\circ K$, temperaturas que corresponden al fluido en los límites de la sección, las cuales se obtienen del perfil de temperatura del fluido.

Las propiedades termo físicas del fluido refrigerante a las temperaturas señaladas y demás temperaturas requeridas se encuentran en el Anexo G.

El calculo del valor del número de Reynolds requiere del diámetro hidráulico y este a su vez del área superficial específica. El área superficial específica es calculada con la Ec. 2.19 para las condiciones establecidas en el ejemplo de cálculo y un diámetro de partícula igual a 0.1 [m] es:

$$S = \frac{6(1 - 0.4)}{0.1[m]}$$

$$S = 36[m^{-1}]$$

Al remplazar este valor en la Ec. 2.18 se obtiene el valor del diámetro hidráulico.

$$d_h = \frac{4 * 0.4}{36[m^{-1}]}$$

$$d_h = 0.044[m]$$

Una vez determinado el diámetro hidráulico, se calcula el valor del número de Reynolds a la temperatura del fluido, $T_{f1} = 612.25^{\circ}K$.

$$Re_h = \frac{620.07 \left[\frac{kg}{m^3} \right] * 0.6 \left[\frac{m}{s} \right] * 0.044[m]}{8.15 * 10^{-5}[Pa.s]}$$

$$Re_h = 2.03 * 10^5$$

El valor del número de Prandlt se determina con la Ec. 1.10 y al remplazar los parámetros correspondientes es igual a:

$$Pr = \frac{C_{pf} * \mu}{k_f}$$

Donde:

$$C_{pf} = 5835, \left[\frac{J}{kg^{\circ}K} \right]$$

$$\mu = 8.15 * 10^{-5} [Pa.s]$$

$$k_f = 0.5 \left[\frac{W}{m^{\circ}K} \right]$$

$$Pr = \frac{5835 \left[\frac{J}{kg^{\circ}K} \right] * 8.15 * 10^{-5}[Pa.s]}{0.5 \left[\frac{W}{m^{\circ}K} \right]}$$

$$Pr = 0.951$$

El número de Nusselt se obtiene de la Ec. 1.8 cuyo valor es:

$$Nu = (0.23)(2.03 * 10^5)^{0.7}(0.951)^{1/3}$$

$$Nu = 1173.58$$

Para calcular el coeficiente de convección se emplea la Ec. 2.20

$$h = \frac{Nu * k_f}{d_h} \quad (\text{Ec. 2.20})$$

Al sustituir los valores correspondientes determinados para una temperatura de $T_{f1} = 612.25^\circ K$, el valor del coeficiente de convección h_{f1} es:

$$h_{f1} = \frac{1173.58 * 0.5 \left[\frac{W}{m^\circ K} \right]}{0.044[m]}$$

$$h_{f1} = 15347.21 \left[\frac{W}{^\circ K m^2} \right]$$

El valor del coeficiente de convección h_2 se calculó con las propiedades del fluido para una temperatura $T_{f2} = 614.50^\circ K$ utilizando las Ec. 2.17, Ec. 1.10, Ec. 1.8 y Ec. 2.20 su valor fue de:

$$h_{f2} = 15297.89 \left[\frac{W}{^\circ K m^2} \right]$$

Para determinar los valores de las constantes de la solución de la ecuación del modelado de la transferencia de calor en las esferas de combustible se requiere del valor de la tasa de generación volumétrica de la esfera la cual se obtiene de la Ec. 2.21.

$$q''' = \frac{P_r}{V_{Er}} \quad (\text{Ec. 2.21})$$

Donde:

$$P_r = \text{Potencia real de la esfera de combustible, [W]}$$

$$V_{Er} = \text{Volumen de la esfera real, [m}^3\text{]}$$

El valor de la potencia real de la esfera es 134.4 [W] (Sefidvash F., 2016). El volumen de la esfera equivalente se calcula considerando un diámetro de 0.015 [m], como se muestra en la Ec. 2.22 (Bibb S., 2003).

$$V_{Er} = \frac{4}{3} * \pi * r_r^3 \quad (\text{Ec. 2.22})$$

Donde:

$$r_r = \text{Radio real de la esfera, [m]}$$

El volumen de la esfera es igual a:

$$V_{Er} = \frac{4}{3} * \pi * \left(\frac{0.015}{2}\right)^3 [m^3]$$

$$V_{Er} = 1.767 * 10^{-6} [m^3]$$

Remplazando el valor del volumen y la potencia equivalente de la esfera en la Ec. 2.21 se obtiene el valor de la generación de calor por unidad de volumen.

$$q''' = \frac{134.4[W]}{1.767 * 10^{-6}[m^3]}$$

$$q''' = 7.61 * 10^7 \frac{[W]}{[m^3]}$$

Los valores de las constantes de la Ec. 2.10 se determinaron remplazando los parámetros establecidos en las ecuaciones Ec. 2.15, Ec. 2.16 y se obtuvo la Ec. 2.23 que describe el perfil de temperatura de la esfera de combustible nuclear, en un arreglo del tipo BCC y una velocidad del fluido refrigerante de 0.6 [m/s].

$$T_w = -1349290.78x^2 + 134958.58x + 860.73 \quad (\text{Ec. 2.23})$$

La Ec. 2.23 permite determinar la temperatura de pared en la esfera al ser evaluada en los puntos ($x = 0$) y ($x = 0.1$). Las ecuaciones para los distintos tipos de arreglo del lecho y las velocidades del fluido refrigerante para calcular la temperatura de pared se encuentran en el Anexo G.

Para obtener el perfil de temperatura del combustible en estado estacionario, se recurre a la ecuación general de calor, para una esfera con generación interna de energía como se describe en la Ec. 2.24 (Incropera F., 1999).

$$\frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{dT}{dr} \right) + \frac{r^2 * q'''}{k_s} = 0 \quad (\text{Ec. 2.24})$$

Al separar variables en la Ec. 2.24 e integrar se obtiene, la solución general de la ecuación diferencial Ec. 2.25 y la solución particular Ec. 2.26.

$$\frac{dT}{dr} = \frac{-q'''r}{3k_s} + \frac{C_3}{r^2} \quad (\text{Ec. 2.25})$$

$$T = \frac{-q'''r^2}{6k_s} - \frac{C_3}{r} + C_4 \quad (\text{Ec. 2.26})$$

Para establecer las condiciones de frontera en la esfera se conoce que la generación de calor es uniforme y la temperatura de pared (T_w) es distinta para los extremos como se muestra en la Figura 2.43.

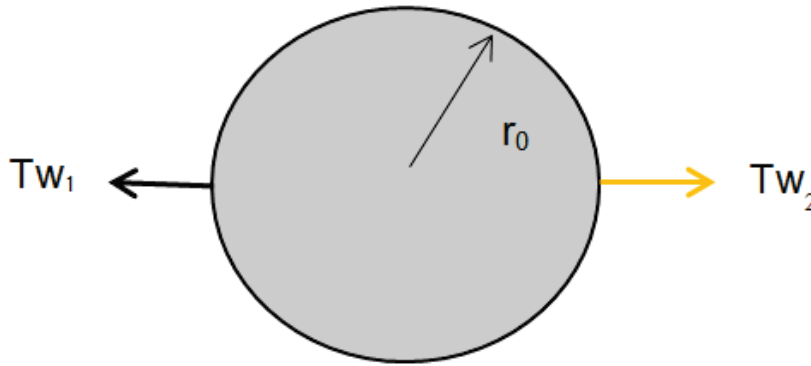


Figura 2.43. Temperatura de pared en la esfera combustible
(Fuente: Propia)

Las condiciones de frontera para encontrar las constantes de la solución particular de la Ec. 2.24 se describen a continuación (Lauzz S., 2008):

Condición de frontera 1, si $r = 0$

$$\left. \frac{dT}{dr} \right|_{r=0} = 0$$

Condición de frontera 2, si $r = r_0$

Tramo derecho

$$T = T_{w2}$$

Tramo izquierdo

$$T = T_{w1}$$

Al aplicar la condición de frontera 1 en la Ec. 2.25 se obtiene:

$$\frac{-q'''r^2}{3k_s} + \frac{C_3}{r^2} = 0 \quad (\text{Ec. 2.27})$$

Despejando C_3 de la expresión anterior se obtiene la Ec. 2.28.

$$C_3 = \frac{q'''r^3}{3k_s} \quad (\text{Ec. 2.28})$$

Al evaluar la Ec. 2.28 cuando $r = 0$ se determina el valor de la constante C_3

$$C_3 = 0$$

Para determinar el valor de la constante C_4 en la Ec. 2.26 se considera la condición de frontera 2, para el tramo derecho e izquierdo y el valor de C_3 .

La expresión que se obtiene para la constante C_4 es:

$$C_4 = \frac{q'''r_0^2}{6k_s} + T_{w12}$$

Donde:

$$T_{w12} = \text{Temperatura de pared 1 ó 2 según corresponda, } [^{\circ}K]$$

Una vez determinadas las expresiones de las constantes, éstas se remplazaron en la Ec. 2.26 y se obtuvo la Ec. 2.29.

$$T = \frac{q'''(r_0^2 - r^2)}{6k_s} + T_{w1-2} \quad (\text{Ec. 2.29})$$

Donde:

$$r_0 = \text{Radio de la esfera, } 0.05 [m]$$

$$k_s = \text{Conductividad Térmica del sólido, } \left[\frac{W}{m^{\circ}K}\right]$$

$$q''' = \text{Generación de calor de la esfera por unidad de volumen } \left[\frac{W}{m^3}\right]$$

Al remplazar los valores de los parámetros de la Ec. 2.29 se obtiene la Ec. 2.30 que describe el perfil de temperatura de la esfera combustible.

$$T = \frac{7.61 * 10^7 (0.05^2 - r^2)}{6 * 28.2} + T_{w_{1-2}}$$

$$T = -449763.593r^2 + 1124.408 + T_{w_{1-2}} \quad (\text{Ec. 2.30})$$

Retomando el ejemplo de cálculo para la presente sección, se determinará el perfil de temperatura de la esfera combustible para un arreglo BCC y una velocidad del fluido de 0.6 [m/s].

Como primer paso se determinan las temperaturas de pared, al remplazar los valores de ($x = 0$) y ($x = d_p = 0.1$) en la Ec. 2.23.

$$T_w = -1349290.78x^2 + 134958.58x + 860.73$$

si $x = 0$

$$T_{w1} = 860.73^\circ K$$

si $x = 0.1$

$$T_{w2} = 863.68^\circ K$$

Tramo derecho, La Figura 2.44 ilustra la ubicación y el valor de la temperatura de pared para el tramo derecho.

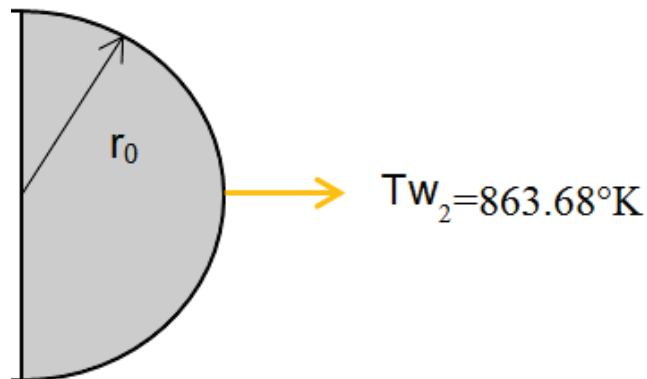


Figura 2.44. Temperatura de pared tramo derecho
(Fuente: Propia)

La ecuación que describe el perfil de temperatura de la esfera para el tramo de análisis es:

$$T = -449763.593r^2 + 1124.408 + T_{w_2}$$

$$T = -449763.593r^2 + 1988.088$$

Tramo Izquierdo, La Figura 2.45 ilustra la ubicación y el valor de la temperatura de pared para el tramo izquierdo.

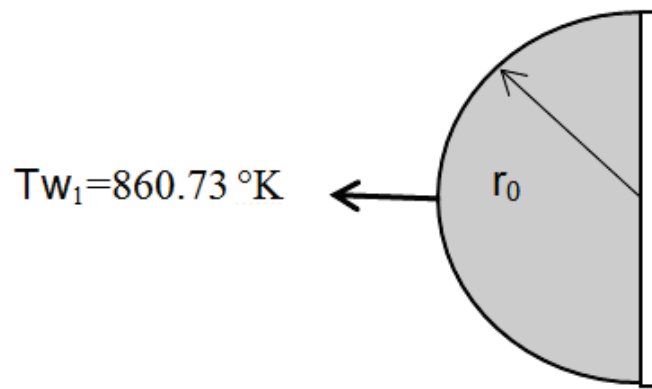


Figura 2.45. Temperatura de pared tramo izquierdo
(Fuente: Propia)

La ecuación que describe el perfil de temperatura de la esfera para el tramo de análisis es:

$$T = -449763.593r^2 + 1124.408 + T_{w_1}$$

$$T = -449763.593r^2 + 1985.14$$

Para obtener el valor de la temperatura en el centro de la esfera en la Ec. 2.30, se reemplaza el valor de $r = 0$ en la Ec. 2.30 .

En el presente ejemplo el valor de la temperatura en centro de la esfera es:

$$T_c = 1124.408 + T_{w_{1+2}}$$

Donde:

$$T_c = \text{Temperatura en el centro de la esfera, } [^{\circ}K]$$

$$T_{w_{1+2}} = \text{Promedio de temperatura de pared, } 862.28 \text{ [}^\circ\text{K]}$$

Sustituyendo el valor del promedio de la temperatura se obtiene:

$$T_c = 1986.69^\circ\text{K}$$

En la Tabla 2.10 se muestran los valores que constituyen el perfil de temperatura de la esfera combustible obtenidos mediante el modelo matemático propuesto y su comparación con los valores obtenidos en la simulación.

Tabla 2.9. Perfil de temperatura de la esfera combustible

Posición (x) [m]	Radio (r) [m]	Temperatura modelo [K]	Temperatura simulación [K]	Porcentaje de error
0	Tramo izquierdo 0.05	860.73	859.34	0.16
0.0125	0.0375	1352.65	1283.27	5.41
0.025	0.025	1633.76	1707.19	4.30
0.0375	0.0125	1951.23	2112.84	7.65
0.05	Temperatura centro r =0	1986.69	2131.12	6.80
0.0625	0.0125	1951.23	2112.84	7.65
0.075	0.025	1706.99	1645.81	3.72
0.0875	0.0357	1355.61	1278.77	6.01
0.1	Tramo derecho 0.05	863.68	861.74	0.23

(Fuente: Propia)

Como se puede apreciar el modelo predice de forma adecuada el perfil de temperatura de la esfera combustible; al comparar los valores obtenidos con la simulación el porcentaje de error es menor al ocho por ciento.

2.2.6. Presentación de resultados para el combustible nuclear, Arreglo FCC, diferentes velocidades del fluido

En las Figuras 2.46, 2.47, 2.48 y 2.49 se puede observar el perfil de temperatura de las esferas de combustible nuclear para una velocidad de 0.4, 0.6, 0.8 y 1 [m/s]

respectivamente. Se aprecia que para la sección seleccionada, la cual presenta el mayor valor de temperatura en la esfera combustible, la distribución de temperatura en función de su longitud mantiene una relación cuadrática.

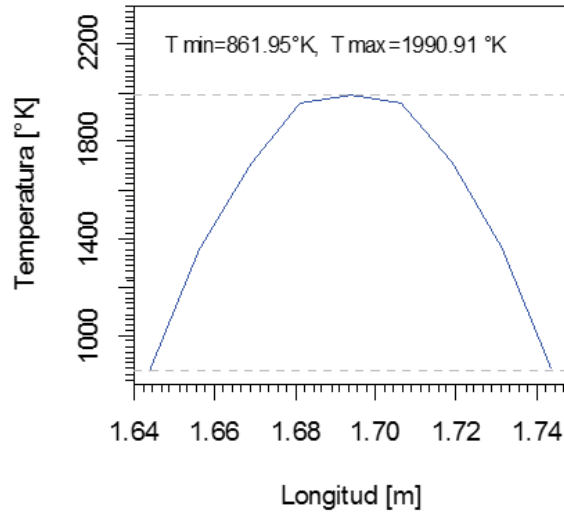


Figura 2.46. Perfil de temperatura de las esferas, Velocidad 0.4 [m/s] (Fuente: Propia)

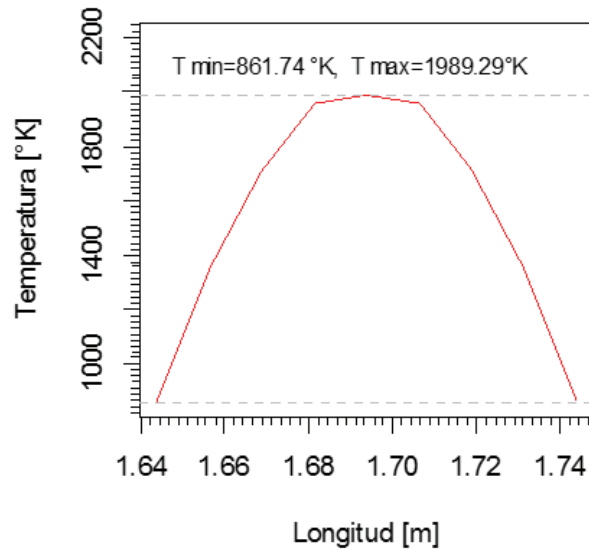


Figura 2.47. Perfil de temperatura de las esferas, Velocidad 0.6 [m/s] (Fuente: Propia)

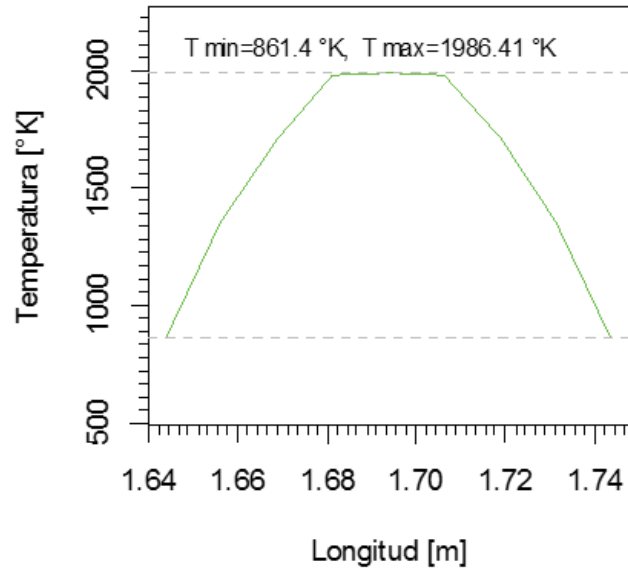


Figura 2.48. Perfil de temperatura de las esferas, Velocidad 0.8 [m/s]
(Fuente: Propia)

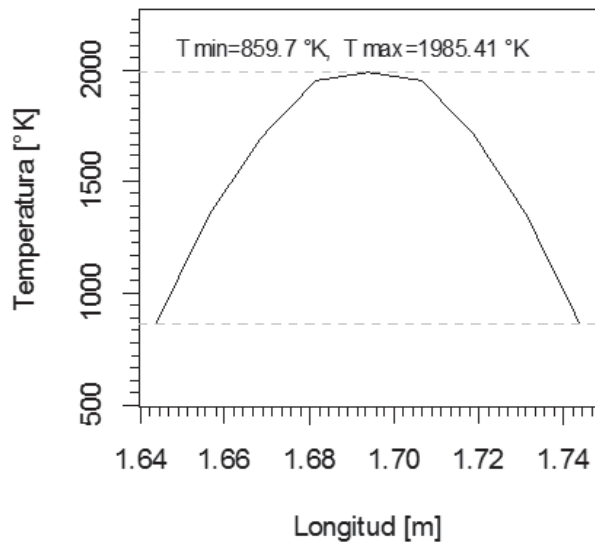


Figura 2.49. Perfil de temperatura de las esferas, Velocidad 1 [m/s]
(Fuente: Propia)

2.2.7. Presentación de resultados para el combustible nuclear, Arreglo BCC, diferentes velocidades del fluido

Las Figuras 2.50, 2.51, 2.52 y 2.53 exhiben el perfil de temperatura de las esferas de combustible nuclear para una velocidad de 0.4, 0.6, 0.8 y 1 $[m/s]$ respectivamente. Es posible visualizar que la temperatura de la esfera se incrementa en un tramo cercano a la mitad de su diámetro y luego disminuye, al igual que en el arreglo FCC la relación entre la temperatura de la esfera combustible y su longitud es cuadrática.

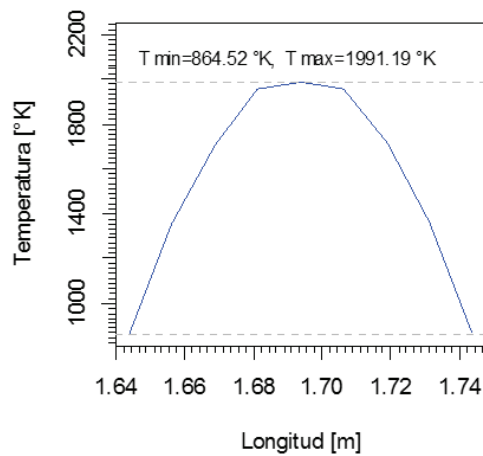


Figura 2.50. Perfil de temperatura de las esferas, Velocidad 0.4 $[m/s]$
(Fuente: Propia)

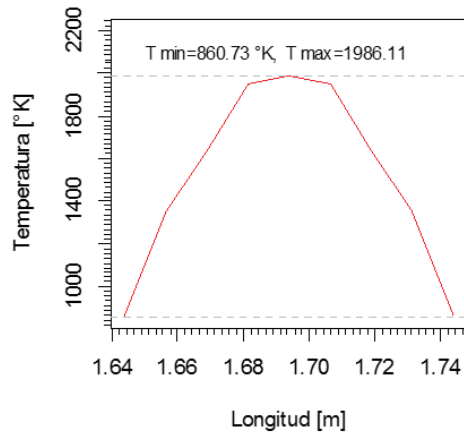


Figura 2.51. Perfil de temperatura de las esferas, Velocidad 0.6 $[m/s]$
(Fuente: Propia)

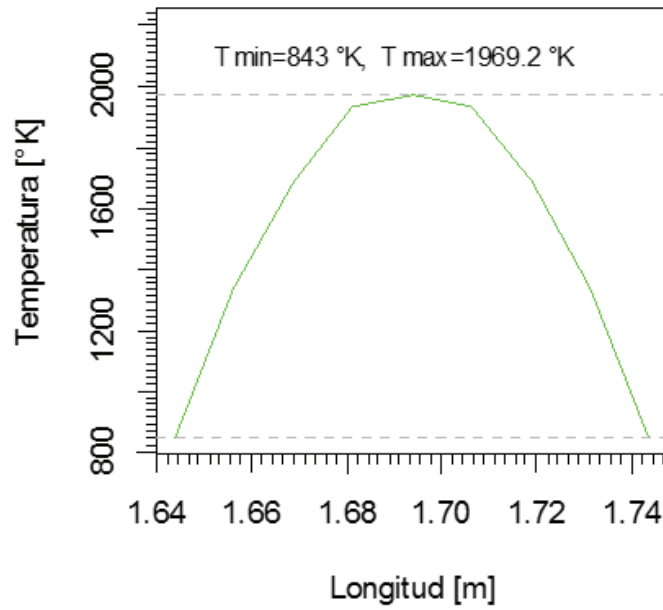


Figura 2.52. Perfil de temperatura de las esferas, Velocidad 0.8 [m/s]
(Fuente: Propia)

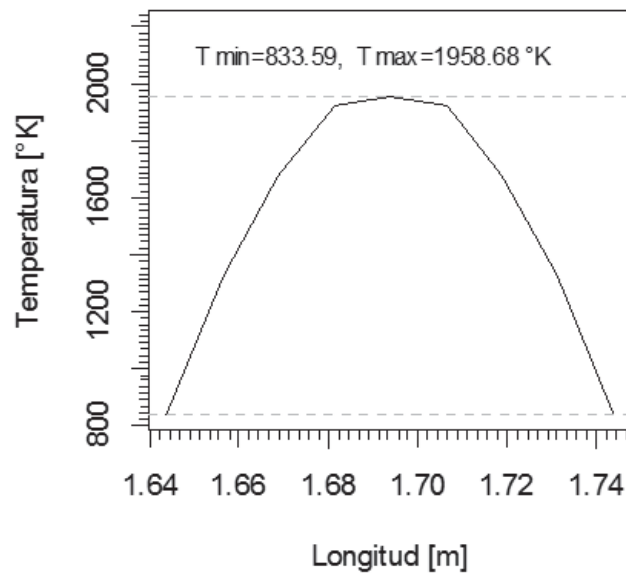


Figura 2.53. Perfil de temperatura de las esferas, Velocidad 1 [m/s]
(Fuente: Propia)

2.2.8. Modelado de presiones en el lecho del reactor

El modelo matemático teórico establecido para determinar la caída de presión en el lecho del reactor nuclear corresponde a la relación matemática, conocida como la ecuación de Ergun, Ec. 1.7 descrita en el apartado Modelo teórico de la caída de presión de un lecho fijo, en el capítulo 1. Dicha ecuación considera a la velocidad superficial del fluido refrigerante para los cálculos de la caída de presión.

Los valores de los factores de viscosidad e inercial son 150 y 1.75 ya que el lecho de estudio esta formado por partículas esféricas.

A continuación se presenta un ejemplo de cálculo de la caída de presión para un lecho con arreglo de esferas BCC, velocidad superficial del fluido refrigerante de 0.4 [m/s], porosidad correspondiente a 0.4 y la longitud del lecho de 1.8 [m]:

$$\frac{\Delta P}{L} = 1.75 \frac{(1 - \varepsilon) \rho v_s^2}{\varepsilon^3 d_p} + 150 \frac{(1 - \varepsilon)^2 \mu v_s}{\varepsilon^3 d_p^2}$$

Donde:

ΔP = Caída de presión, [Pa]

L = Longitud del lecho, [m]

d_p = Diámetro de partícula, [m]

v_s = Velocidad superficial del fluido refrigerante, [m/s]

ρ = Densidad del fluido refrigerante a 290 °C, [$\frac{kg}{m^3}$]

μ = Viscosidad del fluido refrigerante a 290 °C, [Pa.s]

ε = Porosidad

Remplazando los parámetros requeridos y despejando la variación de presión de la Ec. 1.7 se obtiene:

$$\Delta P = 1.8 [m] * \left(1.75 \frac{(1 - 0.4) 746 \left[\frac{kg}{m^3} \right] * 0.4^2 \left[\frac{m^2}{s^2} \right]}{0.4^3} + 150 \frac{(1 - 0.4)^2 9.26 * 10^{-5} [Pa.s] * 0.4 \left[\frac{m}{s} \right]}{0.4^3 * 0.1^2 [m^2]} \right)$$

$$\Delta P = 35273.54 [Pa]$$

$$\Delta P = 0.0353[\text{MPa}]$$

La caída de presión en el lecho de tipo BCC, con una porosidad de 0.4 y una velocidad superficial del fluido refrigerante de 0.4 [m/s] es igual a 0.0353 [MPa] lo cual representa una **presión a la salida del lecho** de 15.965 [MPa].

En la Tabla 2.10 se detallan los valores de la presión de salida en el lecho del reactor para cada configuración y velocidad respectiva.

Tabla 2.10. Presión de salida

ARREGLO BCC		
Velocidad del refrigerante [m/s]	Presión de entrada [MPa]	Presión de salida [MPa]
0.4	16	15.965
0.6	16	15.921
0.8	16	15.859
1	16	15.780
ARREGLO FCC		
Velocidad del refrigerante [m/s]	Presión de entrada [MPa]	Presión de salida [MPa]
0.4	16	15.762
0.6	16	15.464
0.8	16	15.048
1	16	14.512

(Fuente: Propia)

Consideraciones para la obtención del perfil de presiones

Para obtener el perfil de presiones en función de la longitud axial del lecho se asume al fluido como flujo tapón y se calcula para cada longitud del lecho su presión correspondiente. Los valores obtenidos para el perfil de presiones en el lecho para los arreglos BCC y FCC se muestran en el Anexo H.

2.2.9. Presentación de resultados para el perfil de presiones, Arreglo FCC, diferentes Velocidades

En esta sección se presentan las gráficas de perfiles de presión del lecho para cada configuración de las esferas y velocidades del fluido.

En la Figura 2.54 se puede observar el perfil de presiones del lecho para una velocidad de 0.4, 0.6, 0.8 y 1 [m/s] respectivamente. Se puede notar que el valor de la presión de salida disminuye a medida que el valor de la velocidad superficial del fluido refrigerante aumenta.

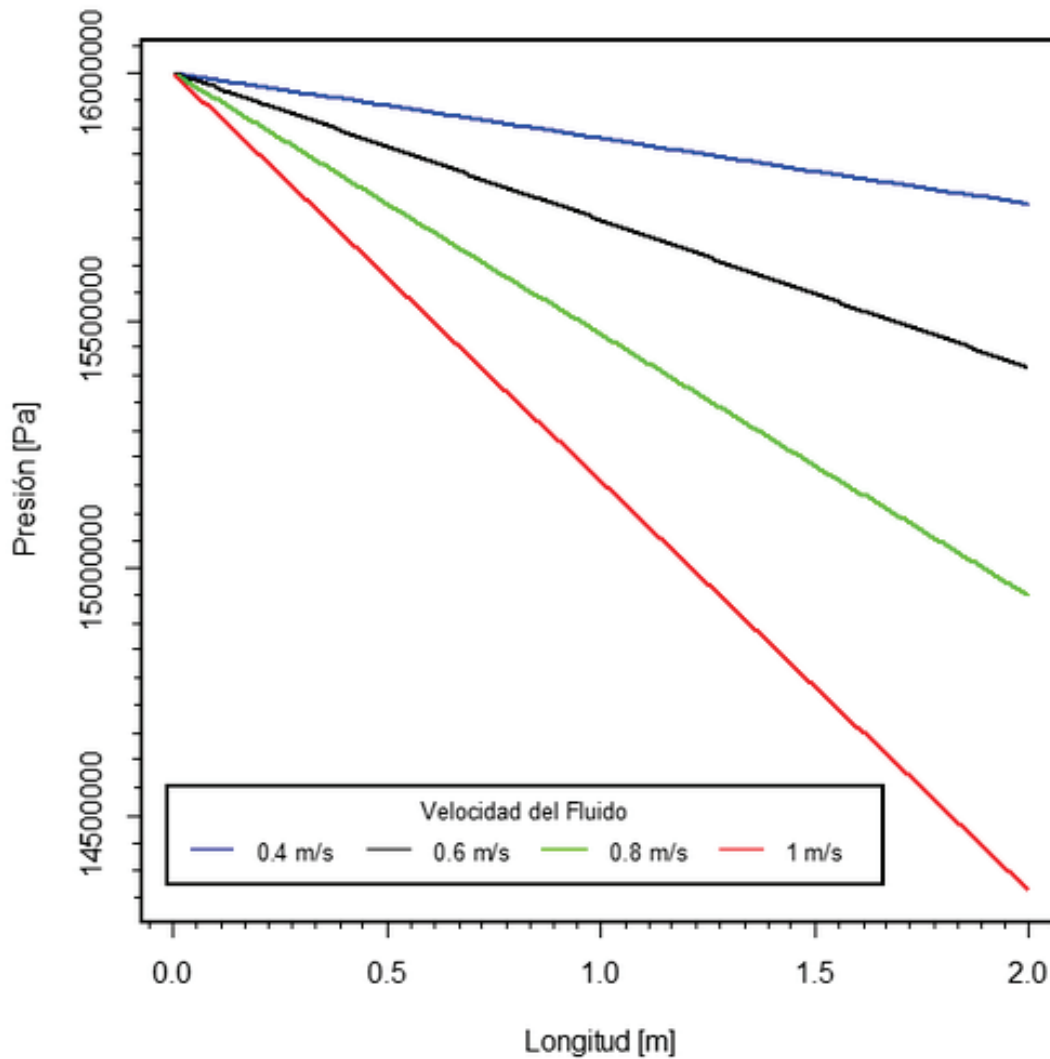


Figura 2.54. Perfil de presiones, arreglo FCC, varias velocidades del fluido (Fuente: Propia)

2.2.10. Presentación de resultados para el perfil de presiones, Arreglo BCC, diferentes Velocidades

La Figura 2.55 muestra el perfil de presiones del lecho para una velocidad de 0.4, 0.6, 0.8 y 1 [m/s] respectivamente. Como se puede observar la variación de la presión de salida del lecho en función de su longitud describe una tendencia lineal, además se aprecia que la caída de presión para cada valor de velocidad es menor a las determinadas en el arreglo FCC, el análisis de este comportamiento se discutirá con mayor detalle en el Capítulo III.

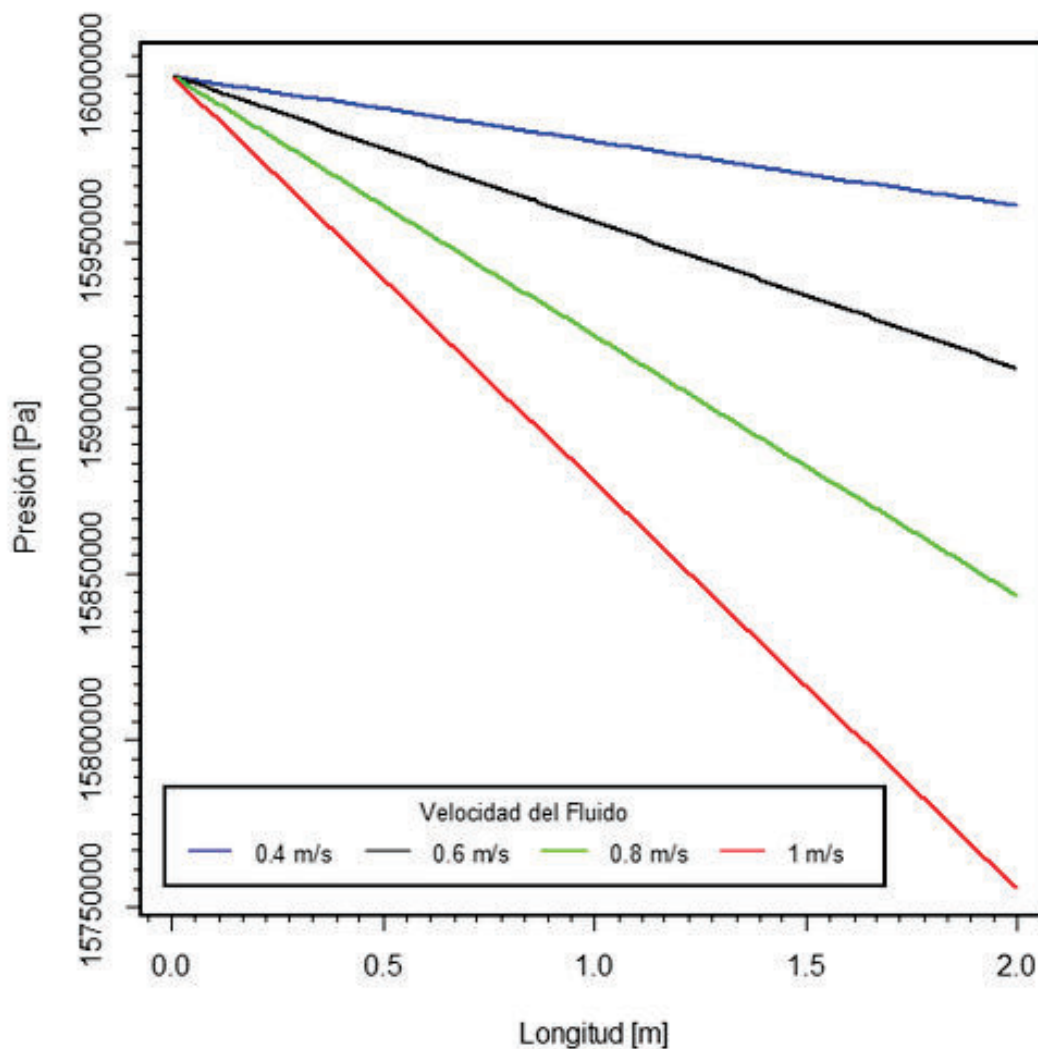


Figura 2.55. Perfil de presiones, arreglo BCC, varias velocidades del fluido (Fuente: Propia)

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para efectos de análisis el presente capítulo contiene información que corresponde a la comparación de los perfiles modelados y simulados tanto de la temperatura del fluido, la temperatura de la esfera combustible y el perfil de presiones. Además, se efectúa un breve análisis estadístico con los errores porcentuales obtenidos de la validación de los datos modelados contra los datos obtenidos de la simulación. Posteriormente, se realiza las gráficas de control de trabajo óptimo de la temperatura de las esferas dentro del lecho del reactor nuclear; seleccionando así las condiciones y el arreglo más adecuado para el funcionamiento del reactor.

3.1. Análisis de los perfiles simulados y modelados de la temperatura del refrigerante, arreglo FCC

Para la simulación en arreglo FCC se sabe que provoca mayor tortuosidad al paso del fluido refrigerante y es debido a ello que el perfil de temperatura del fluido no se presenta de manera homogénea como se observa en la Figura 3.1; caso contrario sucede con el perfil de temperatura correspondiente al modelo matemático que presenta una relación lineal entre la distancia del lecho y la temperatura del fluido refrigerante. Esto se debe a que en el modelo la geometría del lecho solo es representada por el valor de la porosidad presente en el arreglo, mientras que en la simulación el espacio intersticial de las esferas influye de manera directa en el perfil de temperatura.

En la parte superior del lecho se presentan los mayores valores de temperatura debido a que el fluido refrigerante a medida que avanza en el lecho pierde su capacidad de retirar calor, si bien se observa que para los datos de la simulación existe un decrecimiento del valor de la temperatura esto se debe a que en el tramo superior a los 1.8 [m] la longitud del lecho ha sido superada; mientras que en el caso del modelado se mantiene presente la relación lineal.

La temperatura de salida del refrigerante depende del valor de la velocidad a la que este circula en el lecho fijo como es de esperar, a mayor velocidad del fluido menor temperatura de salida ya que existe mayor cantidad de fluido que retira el calor generado por las esferas.

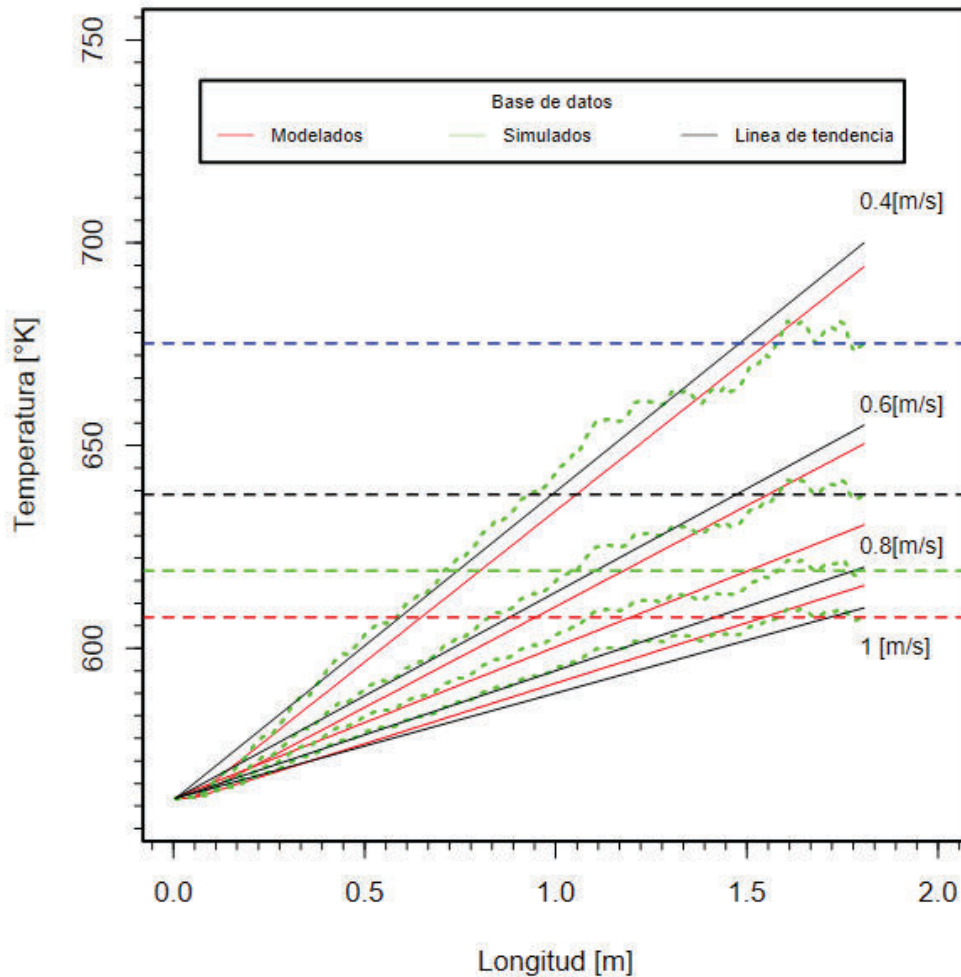


Figura 3.1. Perfil de temperatura datos simulados y modelados arreglo, FCC
(Fuente: Propia)

3.2. Análisis de los perfiles simulados y modelados de la temperatura de la esfera de combustible, arreglo FCC

Las esferas combustibles en el reactor FBNR constituyen un punto crítico en el análisis termohidráulico del núcleo ya que se debe asegurar que los límites térmicos del material del que están constituidas las esferas no supere su temperatura de fusión la cual es de $2840 \text{ }^\circ\text{K}$ (Senor D., 2007).

La Figura 3.2 corresponde a la distribución de temperatura simulado y modelado de la esfera combustible crítica a lo largo del lecho; para los distintos valores de velocidad del fluido se puede observar que en ninguno se alcanza la temperatura de fusión y se presentan valores cercanos a los $2200\text{ }^{\circ}\text{K}$, en condición de operación en estado estable.

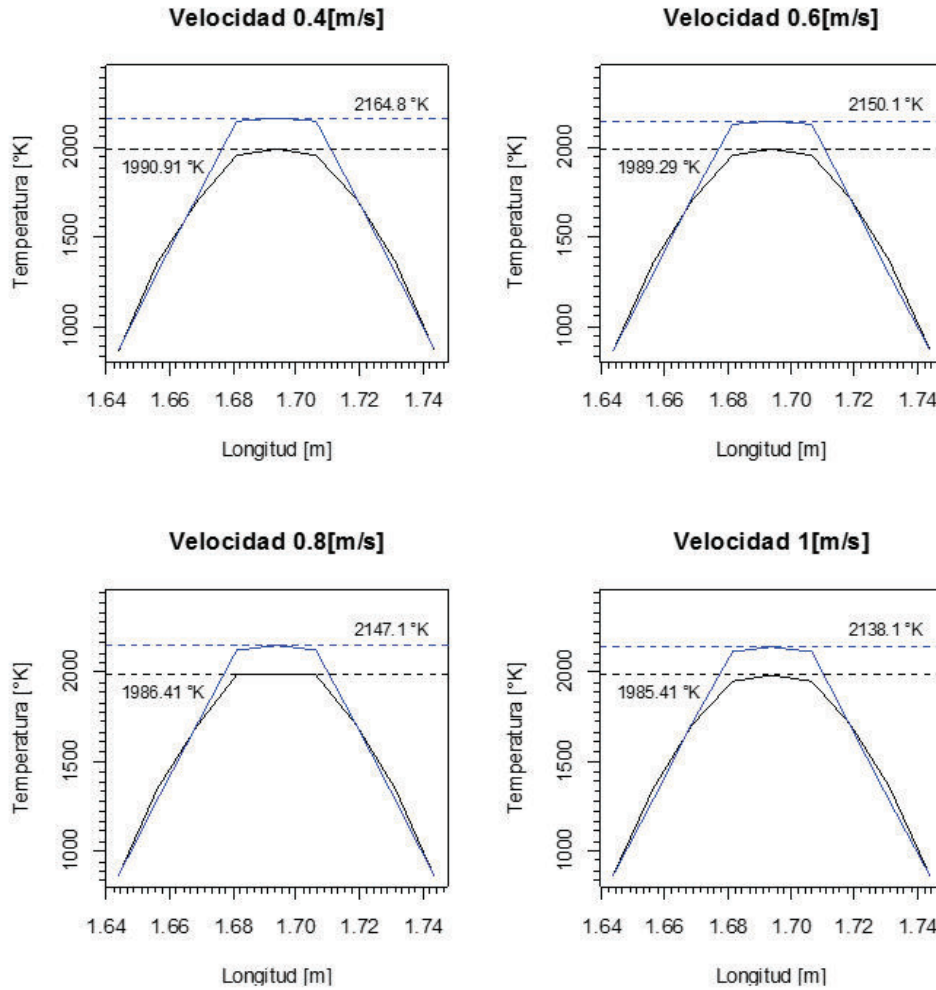


Figura 3.2. Perfil de temperatura de las esferas a diferentes velocidades, arreglo FCC (Fuente: Propia)

Los valores de temperatura superficial de las esferas combustibles en el arreglo FCC se encuentran entre los 850 y $870\text{ }^{\circ}\text{K}$, valores aceptables ya que el Circonio que recubre a las esferas presenta un punto de fusión de $2125\text{ }^{\circ}\text{K}$. Los valores máximos de temperatura se encuentran el centro de la esfera debido a la condición de frontera descrita por la Ec. 2.26

3.3. Análisis de los perfiles simulados y modelados de la presión, arreglo FCC

Para determinar la caída de presión en el lecho y con ello la presión de salida del fluido se utilizó la ecuación de Ergun, si bien en bibliografía se recomienda utilizar dicha ecuación para régimen de transición, el estudio realizado por Barreira, V. (2007) establece que es posible calcular la pérdida de carga en el lecho fijo para todo el rango de condiciones de flujo, sin atender al tipo de régimen que se presente.

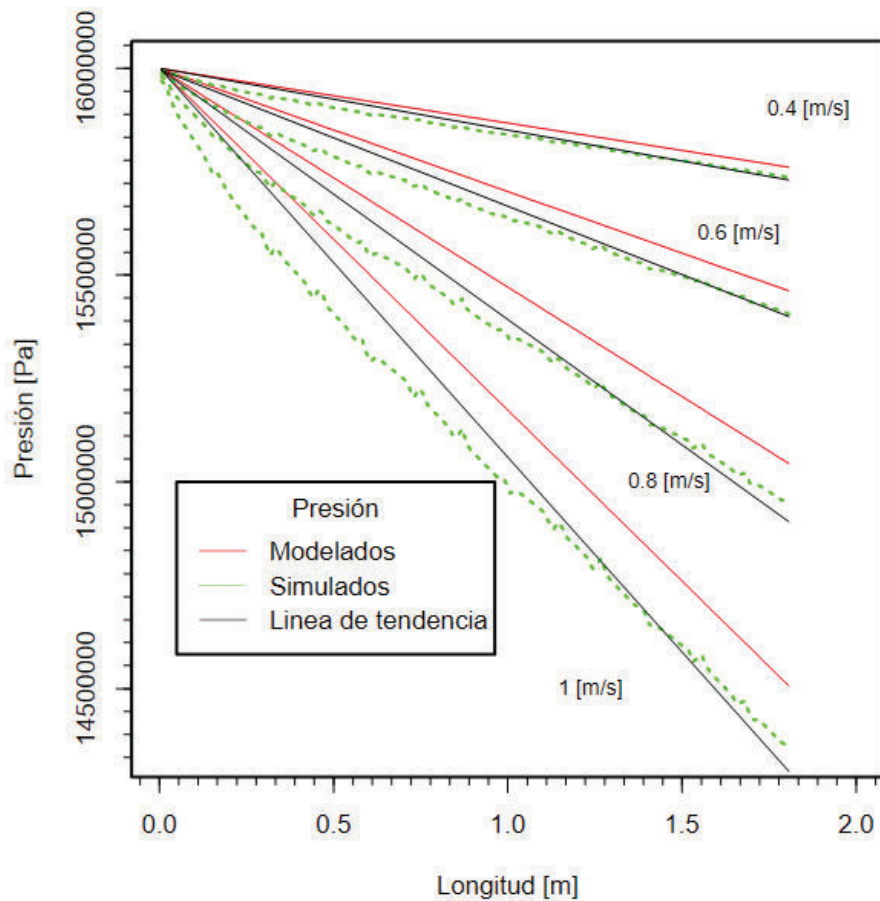


Figura 3.3. Perfil de presiones, arreglo FCC
(Fuente: Propia)

En la Figura 3.3 se comparan gráficamente los valores del modelo matemático y la simulación para el perfil de presiones del lecho fijo, se observa que a menor valor de velocidad la diferencia entre los valores modelados y simulados es menor.

La ecuación de Ergun se estableció para lechos con configuración aleatoria de elementos, es por ello que en lechos estructurados como en el caso de la estructura FCC se presenta diferencia entre los datos obtenidos con el modelo y la simulación (Yang J., 2012).

Se observa que la tendencia del perfil de presiones para el modelo y la simulación es lineal, y presenta una dependencia inversamente proporcional al valor de la velocidad, es por ello que a mayor valor de velocidad de fluido menor valor de presión a la salida del lecho.

La caída de presión esta provocada por la resistencia al paso del fluido en la configuración del lecho fijo, factor asociado a la porosidad como se apreciará en la sección de análisis para la configuración BCC esta caída de presión es menor.

3.4. Análisis de los perfiles simulados y modelados de la temperatura del refrigerante, arreglo BCC

La Figura 3.4 muestra la comparación de los valores simulados y los obtenidos con el modelo matemático, del perfil de temperaturas del fluido para la configuración BCC del lecho fijo del núcleo del reactor FBNR.

Se aprecia una tendencia lineal y homogénea para los datos simulados en comparación a los obtenidos en la configuración FCC, esto se debe a que para la configuración BCC la tortuosidad que presenta es menor, el parámetro característico del lecho fijo que se asocia a la tortuosidad es la porosidad, se mantiene una relación inversa, es decir a mayor tortuosidad menor porosidad y viceversa (Rivas A., 2012).

Las mayores temperaturas del fluido se encuentran al final del lecho debido a que este a medida que avanza el fluido refrigerante disminuye su capacidad de retirar el calor generado por las esferas, similar a lo ya descrito en el perfil de temperatura del fluido para la configuración FCC, en los valores simulados se observa un decremento de la temperatura correspondiente a la sección que esta a fuera del análisis de la longitud del lecho, (1.8 [m]), provocado por la ausencia de esferas combustibles, la transferencia de calor que se da en esta sección corresponden únicamente al fluido refrigerante que dependerá de de factores como el número de Reynolds para un flujo laminar totalmente desarrollado.

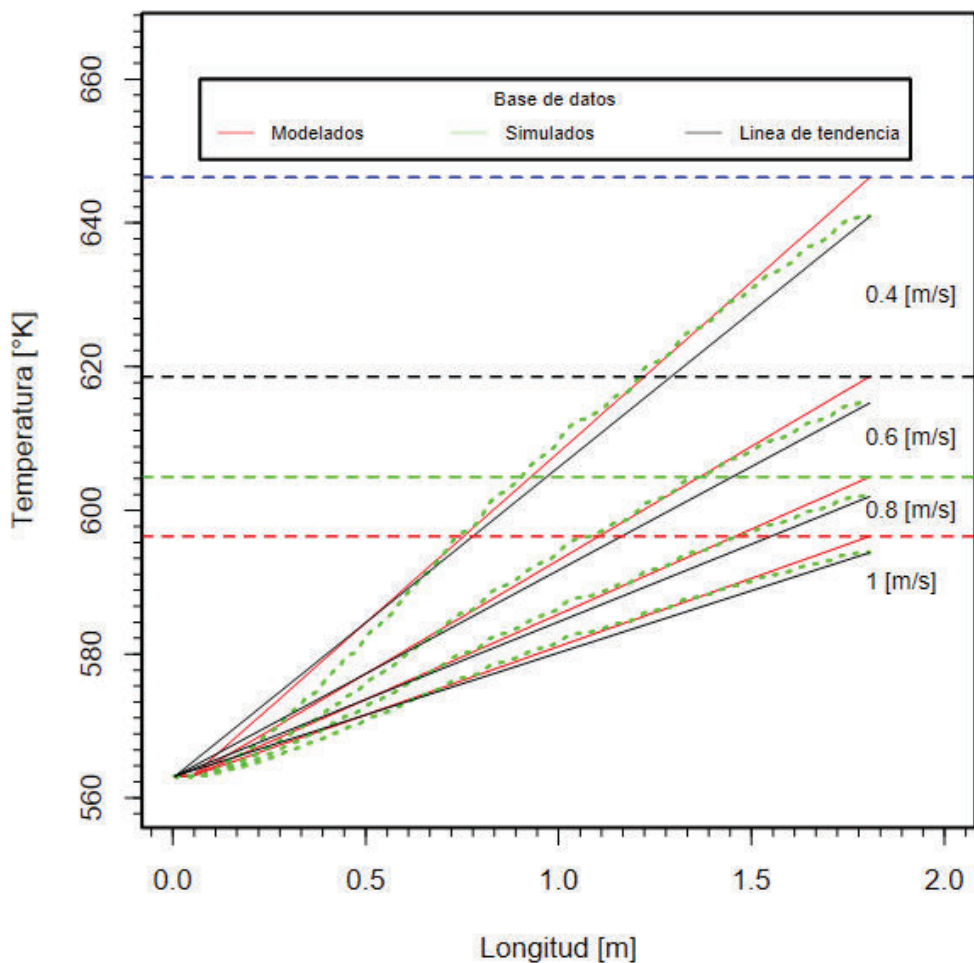


Figura 3.4. Perfil de temperatura datos simulados y modelados arreglo, BCC
(Fuente: Propia)

A diferencia de la configuración FCC los valores obtenidos en la simulación y los determinados mediante el modelo matemático no presentan mayor diferencia. Además los valores alcanzados de temperatura del fluido a la salida del lecho son menores a los obtenidos en la configuración FCC, dado que a menor porosidad se favorece el contacto entre las partículas y el fluido, es posible decir entonces que existe una relación inversa entre la porosidad y la temperatura de salida del refrigerante en el lecho (Dautzenberg A., 2003). La tortuosidad que el fluido refrigerante recorre para este tipo de configuración es menor favoreciendo significativamente en la uniformidad de los perfiles de temperatura del fluido, temperatura de la esfera y presiones a lo largo del lecho del reactor.

3.5. Análisis de los perfiles simulados y modelados de la temperatura de la esfera de combustible, arreglo BCC

Los valores de temperatura superficial de las esferas de combustible para el arreglo BCC son similares a los obtenidos en el arreglo FCC, para los distintos valores de velocidad del fluido.

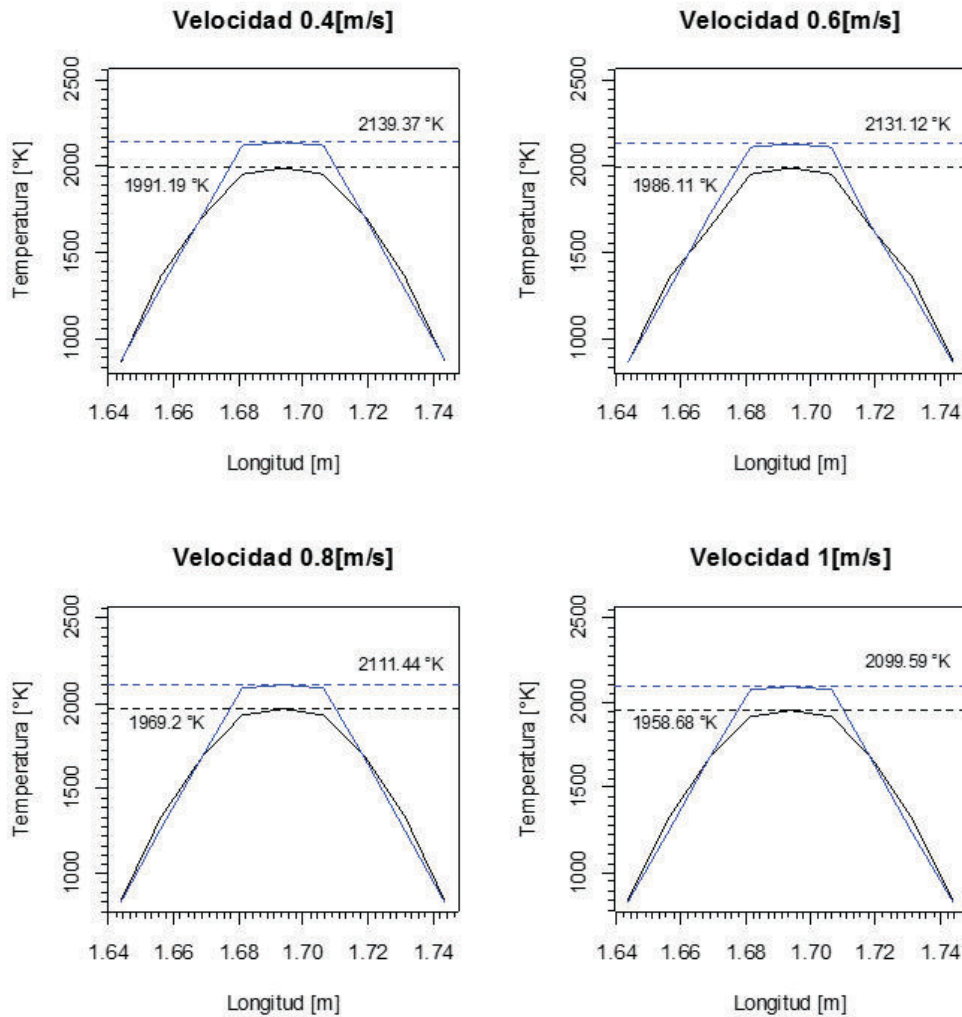


Figura 3.5. Perfil de temperatura de las esferas a diferentes velocidades, arreglo BCC (Fuente: Propia)

Similar a lo observado en la estructura FCC el modelo matemático predice acertadamente las temperaturas de pared, no siendo así para el punto máximo de temperatura donde se presenta la mayor diferencia.

3.6. Análisis de los perfiles simulados y modelados de la presión, arreglo BCC

La tendencia que presentan los valores de presión a lo largo de la longitud axial del lecho es lineal e inversamente proporcional, se presentan valores mayores de presión a la entrada del lecho y valores menores a la salida del lecho, dicho comportamiento se debe a que el fluido debe a travesar el lecho y ello provoca una caída de presión. A comparación del arreglo FCC, el arreglo BCC presenta una menor caída de presión asociado a ello un valor de presión de salida del lecho mayor que el obtenido en el caso FCC. Al presentar mayor porosidad el arreglo BCC, facilita al fluido para que atraviere el lecho sin mayor dificultad ya que el área transversal es mayor en comparación con el arreglo FCC.

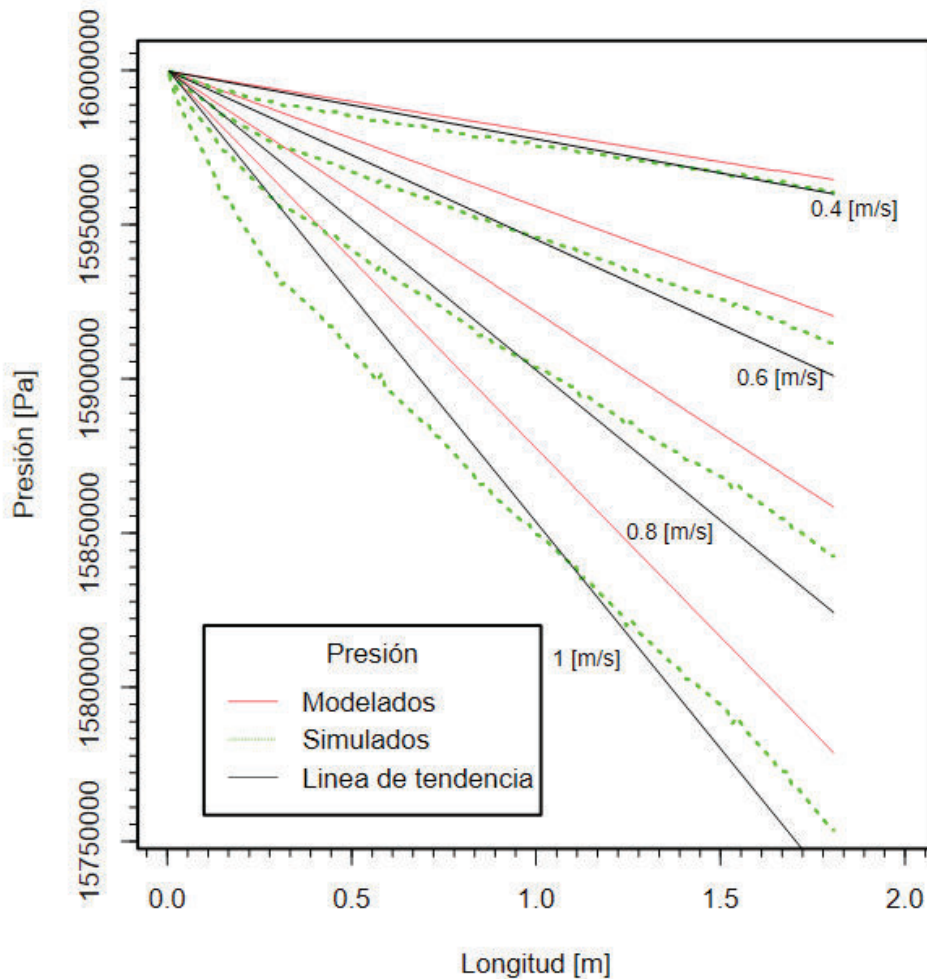


Figura 3.6. Perfil de presiones, arreglo BCC
(Fuente: Propia)

La Figura 3.6 corresponde a la comparación de los valores de presión del fluido refrigerante para el arreglo BCC. Se observa que los valores determinados mediante la ecuación de Ergun son diferentes a los determinados en la simulación, este comportamiento ya se detalló en la sección del arreglo FCC.

La Tabla 3.1 muestra los valores de la caída de presión para los distintos arreglos y velocidades del fluido refrigerante, la caída de presión se incrementa al aumentar la velocidad del fluido refrigerante para cualquier configuración en el lecho. La caída de presiones a través de los huecos de un sólidos es la resultante del frotamiento total de todas las partículas del lecho, la interacción del fluido frente a las esferas generan pérdidas por fricción a lo largo de todo el lecho del reactor; al comparar la caída de presiones se concluye que estos valores dependen de la porosidad, las configuraciones BCC tienen valores bajos en comparación con los arreglos FCC tal como se muestra en estudios realizados por Nemeç y Lebec (2005), lo que confirma los resultados obtenidos en el presente trabajo.

Tabla 3.1. Caída de Presión

ARREGLO BCC	
Porosidad 0.4	
Velocidad [m/s]	Caída de Presión [MPa]
0.4	0.035
0.6	0.079
0.8	0.141
1	0.22
ARREGLO FCC	
Porosidad 0.23	
Velocidad [m/s]	Caída de Presión [MPa]
0.4	0.238
0.6	0.536
0.8	0.952
1	1.49

(Fuente: Propia)

3.7. Análisis de los porcentajes de error

La validación y verificación se usa para controlar los datos obtenidos del modelado matemático y de la simulación, ayudan a determinar si lo propuesto con las ecuaciones matemáticas tienen coherencia con los que proporciona el software COMSOL Multiphysics. Los valores obtenidos determinan cuán efectivo son las consideraciones necesarias que se hizo para el modelado matemático.

3.7.1. Errores obtenidos para arreglo FCC y BCC

Los errores porcentuales resultan de la interacción de la base de datos obtenida de la simulación contra los proporcionados con el modelado matemático. Una breve ecuación muestra como se efectuó la adquisición de estos valores.

$$E_p = \frac{|V_s - V_m|}{V_s} * 100 \quad (\text{Ec. 3.1})$$

Donde:

E_p = Error porcentual

V_s = Valores simulados

V_m = Valores modelados

Utilizando la Ec. 3.1 para la temperatura del fluido del arreglo FCC de 0.4 [m/s] con una longitud del lecho de 0.26875 [m] se tiene:

$$E_p = \frac{|580.27 - 579.33|}{580.27} * 100 = 0.16 \%$$

Este valor de 0.16 % representa una pequeña diferencia entre ambos datos, si este valor superara el 25 % el modelo matemático o simulación estarían mal planteadas por lo que se debería hacer un rediseño de las ecuaciones o considerar nuevas condiciones de frontera para el software (Cajas H., 2015). El procedimiento de adquisición de errores porcentuales se realiza para toda la base de datos obtenida. Posteriormente con ayuda de **R** se procede a crear los diagramas de caja y bigotes para cada una de las muestras de velocidad. Los diagramas de caja o bigotes son una representación gráfica de comparación de varias muestras, en ella se encuentran los valores máximos y mínimos así como los valores atípicos que no corresponderían a una distribución.

Las Figuras 3.7 y 3.8, corresponden a los errores obtenidos del arreglo FCC y BCC, se observa que la dispersión de datos es mucho mayor en el arreglo FCC, el valor máximo del porcentaje de error es del 2.7 % ; cuando la velocidad del fluido es de 0.8 [m/s] hay más datos atípicos pero siguen estando en un rango moderado del error porcentual.

El arreglo BCC tiene menos valores atípicos siendo más estable y uniforme con los errores porcentuales, se observa que mientras la velocidad del fluido disminuye el error porcentual aumenta mostrándose inversamente proporcional; el valor máximo de error es de 0.9 % correspondiente a una velocidad de 0.4 [m/s].

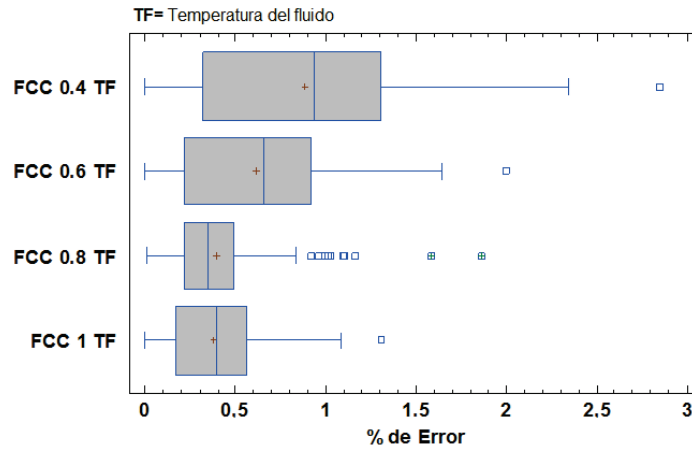


Figura 3.7. Diagrama de caja y bigotes temperatura del fluido, arreglo FCC (Fuente: Propia)

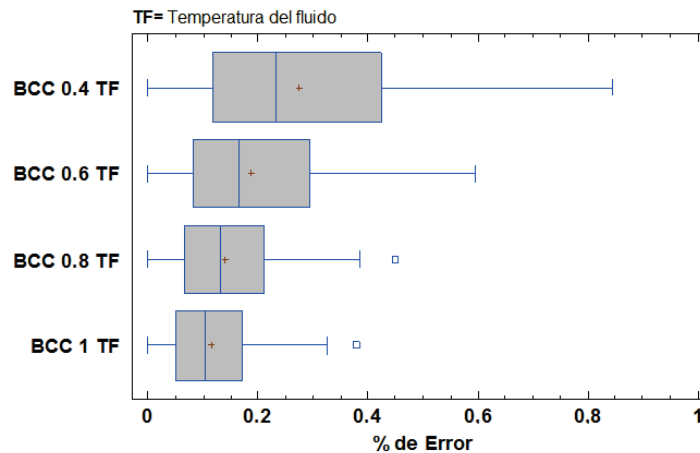


Figura 3.8. Diagrama de caja y bigotes temperatura del fluido, arreglo BCC (Fuente: Propia)

En las Figuras 3.9 y 3.10 se observa el porcentaje de error de las esferas combustibles; en el arreglo FCC hay un máximo del 9 % nuevamnete se ve que que mientras más baja es la velocidad del fluido mayor es el error encontrado existiendo un valor intermedio cuando la velocidad es del 0.8 [m/s]. Los valores máximo del error porcentual tienen relación directa con el centro de la esfera combustible y se debe a los limites de frontera de la ecuación diferencial que gobierna la distribución de temperatura.

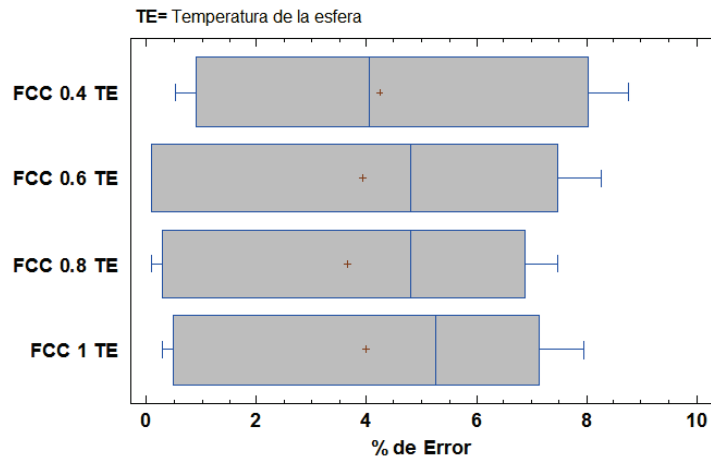


Figura 3.9. Diagrama de caja y bigotes temperatura de la esfera combustible, arreglo FCC (Fuente: Propia)

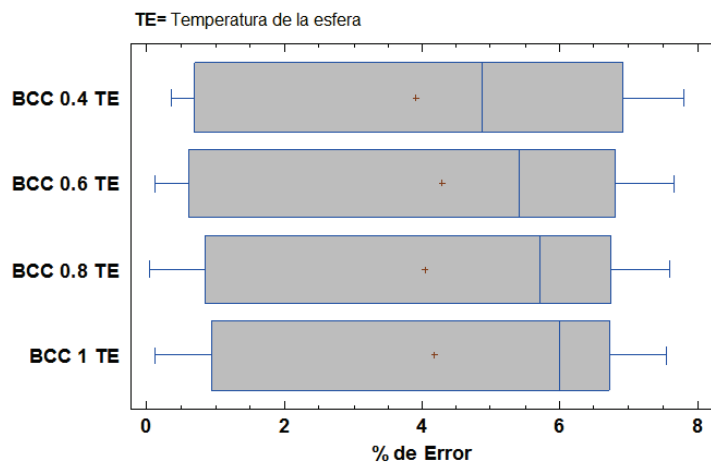


Figura 3.10. Diagrama de caja y bigotes temperatura de la esfera combustible, arreglo BCC (Fuente: Propia)

En el arreglo BCC los errores son más uniformes, no se encuentran valores atípicos para todos los casos de velocidad del fluido, el error máximo corresponde alrededor del 8 % un

punto menos que el arreglo FCC. Al igual que el caso FCC los valores máximos de error porcentual se deben a las condiciones de frontera que tiene la ecuación diferencial. La Figura 3.5 muestra que los valores de temperatura en la mitad de la esfera combustible son altos y que los valores simulados sobrepasan a los modelados, los errores obtenidos se deben a este fenómeno la Figura 3.10 así lo demuestra.

Por otra parte, haciendo un análisis más minucioso en la mecánica de fluidos dentro del lecho del reactor mejorará los valores de convección del fluido refrigerante, optimizando así la ecuación que describe la distribución de temperatura de la esfera. Sin embargo el objetivo de este estudio es determinar los fenómenos internos que provocan la transferencia de calor en el lecho del reactor así que queda como trabajo a futuro mejorar el análisis individual de las esferas sometidas a un fluido que tienen coeficientes de convección variable en la superficie de las esferas. Los alcances obtenidos en este estudio dan una buena aproximación a lo que sucede dentro de la esfera combustible, además se vuelve a recalcar que el error obtenido es inferior al 25 % lo que avala el estudio como confiable.

Las Figuras 3.11 y 3.12 presentan los errores correspondientes a los perfiles de presión, se observa que para el arreglo FCC el porcentaje máximo es del 1.4 % y para el arreglo BCC el máximo valor es de 0.2 % , la diferencia entre ambos arreglos es muy notoria incluso con los valores atípicos que cada una de ellas tiene.

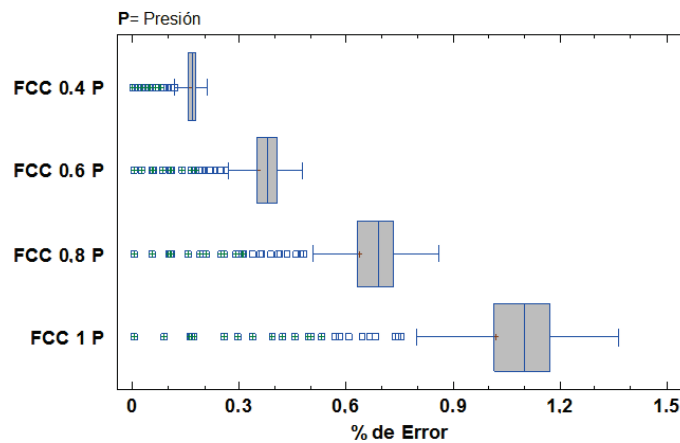


Figura 3.11. Diagrama de caja y bigotes de la presión, arreglo FCC (Fuente: Propia)

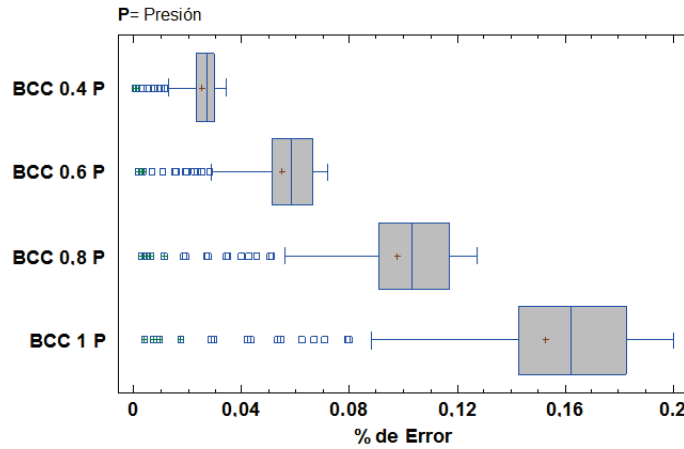


Figura 3.12. Diagrama de caja y bigotes de la presión, arreglo BCC
(Fuente: Propia)

3.8. Gráficas de control de trabajo de las esferas

Para determinar si los valores del perfil de temperatura son aceptable se recurre a las gráficas de control estadístico donde delimitando las curvas del perfil de temperatura de la esfera con los valores de desviación estándar mostrará los límites donde las simulaciones tienen un efecto positivo; las gráficas, diagramas o cartas de control permiten detectar la variación sistémica que se puede generar en un proceso, esto contribuye a identificar y corregir valores atípicos que se presenten durante el funcionamiento del núcleo del reactor.

Hay que considerar que al tratarse de material radioactivo los rangos de tolerancia deben ser muy pequeños las desviaciones de los límites superiores e inferiores no deben superar los $\pm 3\sigma$. Un punto en contra es que los límites de control para estos materiales no son de dominio público delimitando así un estudio más exacto. Por lo tanto se propone las siguientes curvas de control de temperatura haciendo uso de una distribución normal (Correa J., 2002). Las ecuaciones que corresponden a esta distribución son:

$$f_n(x, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \text{Exp}\left(\frac{-1}{2}\left(\frac{x - \mu}{\sigma}\right)^2\right) \quad (\text{Ec. 3.2})$$

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (\text{Ec. 3.3})$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2} \quad (\text{Ec. 3.4})$$

Donde:

μ = Media

σ = Desviación media

Usando los valores mínimos y máximos de las esferas a lo largo del lecho del reactor que se obtienen de las Tablas D.2 y D.5 se encuentran los valores medios y las desviaciones para cada velocidad del fluido, posteriormente se calcula los límites superiores e inferiores, a continuación se presenta un ejemplo de cálculo para arreglo FCC de 0.4 [m/s].

$$\mu = \frac{1}{54} (809.43 + 2082.7 + \dots + 1012.9) = 1331.73$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{54} ((809.43 - 1331.73)^2 + \dots + (1012.9 - 1331.73)^2)} = 616.964$$

$$LCS = \mu + 2 * \sigma \quad (\text{Ec. 3.5})$$

$$LCI = \mu - \sigma \quad (\text{Ec. 3.6})$$

Donde:

LCS = Límite de control superior

LCI = Límite de control inferior

$$LCS = 1331.73 + 2 * 616.964$$

$$LCS = 2565.65 [^{\circ}K]$$

$$LCI = 1331.73 - 616.964$$

$$LCI = 714.766 [^{\circ}K]$$

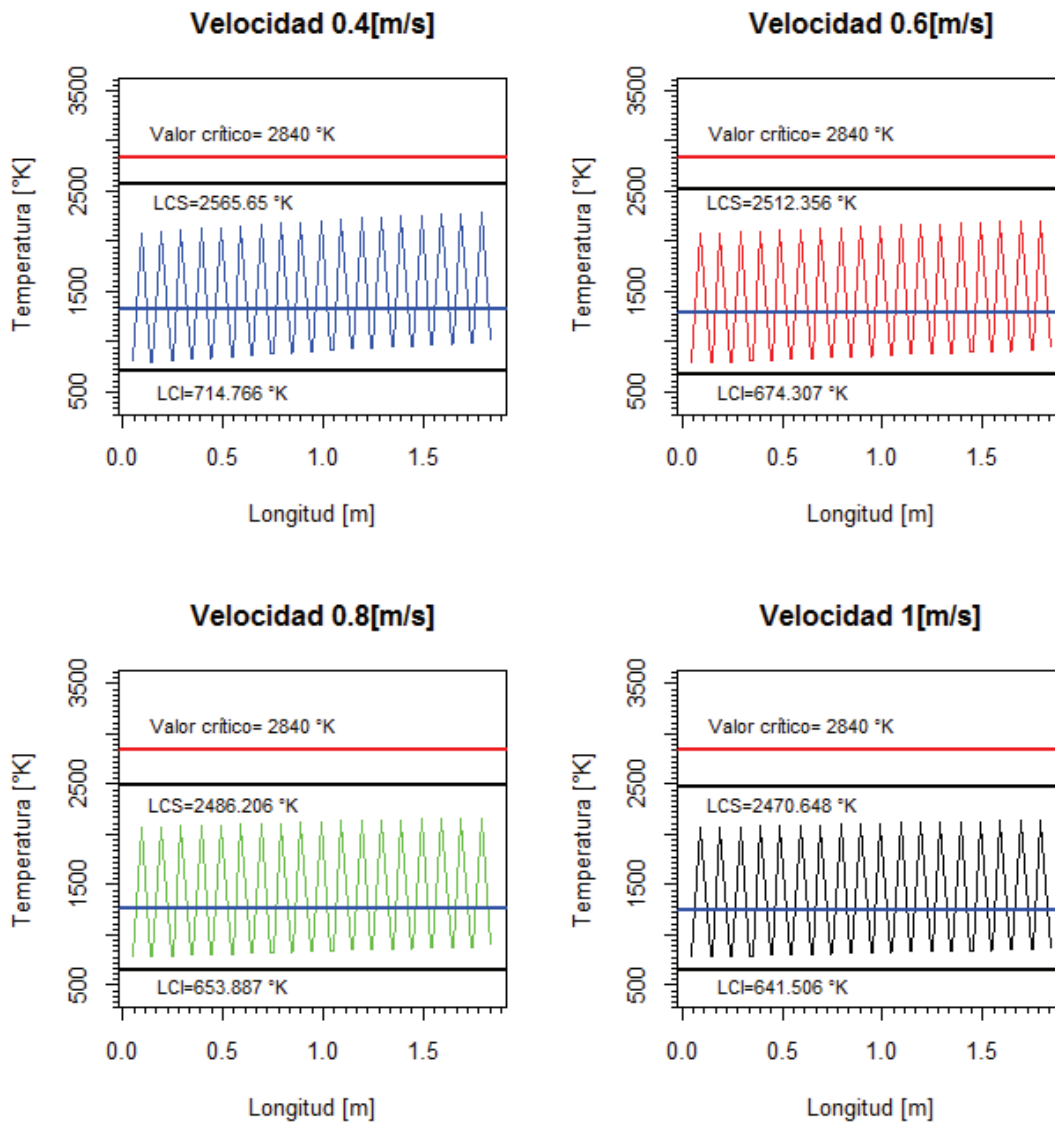


Figura 3.13. Gráfica de control, arreglo FCC
(Fuente: Propia)

Los valores máximos y mínimos del perfil de temperatura de la esfera combustible se observa en las Figuras 3.13 y 3.14, las líneas de color rojo representan el valor crítico máximo que una esfera combustible puede resistir, ($2840\text{ }^{\circ}\text{K}$), las líneas de color negro delimitan los valores mínimo y máximo de funcionamiento, estos valores han sido calculados con las Ec. 3.5 y Ec. 3.6 respectivamente. Si una esfera combustible no esta dentro de los límites de funcionamiento provocaría serios daños dentro del lecho del reactor por lo que el reemplazo de las mismas deberá ser inmediato. Las gráficas de control

básicamente proporciona dos umbrales los mismos que deben ser bien interpretados, por ejemplo, si la esfera supera el valor LCS las probabilidades de que el tratamiento térmico superficial de la esfera falle son más altas provocando el envenenamiento a las esferas que están alrededor desatando así una reacción en cadena extremadamente grave.

Por otro lado si la esfera combustible presenta una temperatura de trabajo inferior al LCI quiere decir que su vida útil acaba, por lo que necesita ser reemplazada para que no sobreexija el funcionamiento de las esferas que se encuentran alrededor de la misma, la eficiencia térmica se ve disminuida afectando negativamente a la productividad de la planta eléctrica.

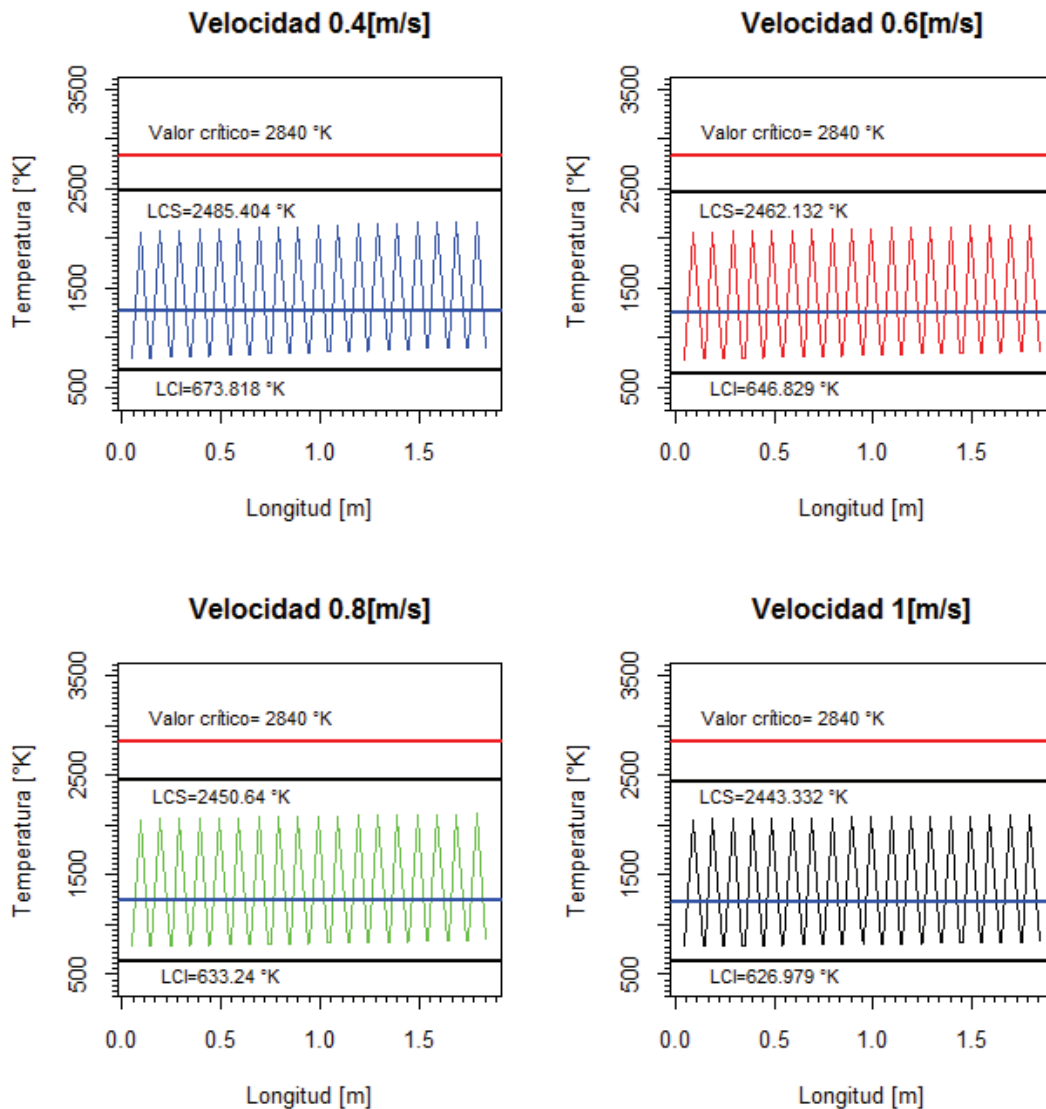


Figura 3.14. Gráfica de control, arreglo BCC
(Fuente: Propia)

3.9. Selección del arreglo y condiciones apropiadas para el funcionamiento del reactor

Una de las técnicas para la selección de alternativas en el caso de decisiones importantes es la investigación y el análisis. Esta metodología supone la resolución de un problema mediante el previo conocimiento de profundidad e impacto; los pasos de mayor importancia para este método son la elaboración de un modelo matemático y una simulación del problema, por lo general este método es menos costoso que el método experimental y presenta resultados cercanos a los reales. Las alternativas de solución para el reactor nuclear se centran en los requerimientos expuestos en la Figura 3.15, los criterios de estabilidad y homogeneidad en el análisis termo hidráulico corresponden a las ponderaciones más altas (Rivas., 2008).

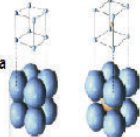
		Correlación BCC		Correlación FCC		Escala de importancia	
		■ Fuertemente positiva	◆ Positiva	◆ Fuertemente positiva	◆ Positiva	Fuerte=9 Media =3 Pequeña=1	
		◆ Negativa	★ Fuertemente negativa	◆ Negativa	★ Fuertemente negativa		
Requerimientos	Arreglos disponibles	BCC	BCC	FCC	FCC	Importancia esperada	
	Estabilidad en el perfil temperatura del fluido refrigerante		■		◆		9
Estabilidad en el decrecimiento de presiones lo largo del lecho			◆		◆	9	
Temperatura de las esferas inferiores a 2840 °K			■		■	9	
Bajas velocidades del fluido		■				3	
Baja diferencia entre datos simulados y modelados		■		◆	◆	3	
Buen control y seguimiento de las esferas combustibles			■	◆		9	
Fácil construcción		■			★	9	
Valor obtenido		36	25	15	24		
Total BCC		61					
Total FCC			39			Ganador → BCC	

Figura 3.15. Selección del arreglo (Fuente: Propia)

Los factores cuantitativos obtenidos de los errores porcentuales dan por sentado que la configuración del tipo BCC presenta una mayor estabilidad frente a el arreglo FCC, en la estructura BCC los datos obtenidos para los parámetros termo hidráulicos se apegan más a los modelos matemáticos conocidos, otro factor cualitativo muestra que un arreglo BCC es viable y menos costoso de construir, también la selección de valores intermedios de la velocidad del fluido abarata el costo de bombas recirculantes y de seguridad dentro del sistema de control.

En la Tabla 3.2 se muestran los resultados finales que pueden ser usados para la construcción de un prototipo, el arreglo del lecho corresponde al tipo BCC con una velocidad de fluido de $0.6 [m/s]$, hay que recalcar que los datos modelados obtenidos en este estudio se asemejan a los simulados por lo que en primera instancia las probabilidades de que estos datos se apeguen a un diseño experimental serán aceptables.

Tabla 3.2. Condiciones de funcionamiento del reactor

Ítem	Condiciones de trabajo
Diámetro del combustible nuclear	0.0015 [m]
Cantidad de esferas combustible	1620000
Potencia por esfera	134.40 [W]
Diámetro del lecho del reactor	1.70 [m]
Longitud del lecho del reactor	1.80 [m]
Tipo de arreglo del material nuclear	BCC
Velocidad del fluido	0.6 [m/s]
Presión de entrada del lecho	16 [MPa]
Temperatura crítica de trabajo	2840 [°K]
Temperatura máxima de funcionamiento	2462.132 [°K]
Temperatura mínima de funcionamiento	646.829 [°K]
Temperatura máxima alcanzada por la esfera	2127.56 [°K]
Temperatura de salida del fluido	624.55 [°K]
Temperatura de entrada del fluido	563 [°K]
Fluido refrigerante	Agua

(Fuente: Propia)

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A continuación se presentan las conclusiones relevantes obtenidas de la simulación y el modelamiento en estado estable de la transferencia de calor y caída de presión en el lecho fijo del núcleo del reactor FBNR y las recomendaciones consideradas para el trabajo realizado.

4.1. Conclusiones

- El objetivo general del proyecto que consiste en modelar y simular la transferencia de calor en estado estacionario en el núcleo del reactor FBNR fue alcanzado, ya que se obtuvieron los modelos matemáticos que permiten determinar el perfil de temperatura del fluido refrigerante y de la esfera combustible, así como el perfil de presiones a lo largo del lecho y al ser validados con los resultados de la simulación realizada en el Software COMSOL MULTIPHYSICS, presentan errores porcentuales menores al 9 %, reflejando confiabilidad de los modelos establecidos.
- La consideración de un análisis con esferas equivalentes en la simulación, influyó positivamente, ya que debido a ello el número de nodos se redujo dentro del solucionador incorporado en el Software, permitió establecer mallados más uniformes, reducir el número de iteraciones y la interfaz multiphysics se consolidó, con lo cuál el tiempo de simulación de 323 horas por corrida disminuyó a un promedio de 37 horas, estableciendo así un hallazgo de simplificación en el modelo de simulación.
- El modelado matemático se basó en el balance de energía en el núcleo del reactor FBNR y las consideraciones establecidas para determinar las expresiones que describen el perfil de temperatura del fluido y del elemento combustible permitieron obtener resultados fiables debido a que el porcentaje de error se encontraba bajo el 20 %, que en estudios de transferencia de calor se considera aceptable.
- En configuraciones del tipo BCC, el modelo matemático establecido para determinar la temperatura del fluido refrigerante presenta un menor error porcentual, el valor máximo obtenido es del 0.9 %, frente a la configuración FCC con un valor correspondiente al 2.7 %. En el perfil de temperatura de las esferas combustibles el

arreglo que presenta menor error porcentual es el del tipo BCC, con un porcentaje máximo de error del 7.8 %, frente al 8.7 % del arreglo FCC, los puntos donde se presenta un mayor porcentaje de error corresponden al centro de la esfera combustible. En los dos tipos de arreglos no se sobrepasó el valor de la temperatura de fusión de los elementos combustibles.

- En base a la estadística se obtuvo la confiabilidad del proceso en lo correspondiente a la temperatura de la esfera combustible, con un porcentaje mayor al 95 % de certeza se puede afirmar que la temperatura para distintas velocidades del fluido y diferente configuración del lecho se encuentra entre los valores del LCS y LCI. Estos umbrales pueden ser interpretados como un estado crítico si se supera el LCS, se provocaría envenenamiento radioactivo a las esferas que se encuentran alrededor, desencadenando enormes problemas en todo el núcleo del reactor y si los valores de temperatura se encuentran por debajo del LCI, la vida útil de la esfera ha terminado.
- La caída de presión en el núcleo del reactor presenta un error máximo del 1.15 % en el arreglo FCC, mientras que en el arreglo BCC fue del 0.2 %, en los arreglos del tipo FCC y BCC se observó que los valores de error porcentual decrecían cuando la velocidad del fluido disminuía. La caída de presión dentro del lecho del núcleo se debe a la resistencia que el fluido refrigerante encuentra al atravesar el lecho empacado. En la configuración FCC, se obtiene un mayor valor de caída de presión en comparación con la configuración BCC, lo que trae consigo que en configuraciones del tipo FCC se utilice una mayor capacidad de bombeo.
- La opción seleccionada para realizar pruebas preliminares en el lecho fijo es la configuración BCC con una velocidad de fluido de 0.6 [m/s], debido a que presenta una menor caída de presión que el arreglo FCC, lo que representa la utilización de bombas de menor capacidad además de que existe una mejor estabilidad en la temperatura del fluido refrigerante en comparación con el arreglo FCC.

4.2. Recomendaciones

- Utilizar la metodología de investigación y análisis para establecer condiciones de operación sin incurrir en gastos de construcción o implementación de reactores de investigación.

- Como trabajo a futuro se podría analizar el lecho fijo del reactor agrupando las esferas con sus dimensiones reales, utilizando condiciones de borde individual por cada elemento combustible, alcanzando como resultado la distribución de temperatura por cada esfera .
- Como punto de partida, utilizar modelos geométricos conocidos para el análisis de la transferencia de calor proporciona valores confiables, sin embargo el afinar y robustecer el modelo matemático proporcionará valores más aproximados al modelo real experimental.
- Utilizar un software de licencia libre que permita la manipulación de una base de datos extensa, debido a que para el pos procesamiento COMSOL proporciona archivos en formato `txt`, el software **R** es pionero en el manejo de este tipo de archivos y en análisis estadístico.
- Utilizar los modelos matemáticos y de simulación obtenidos en el presente proyecto para aplicaciones en otro tipo de actividad por ejemplo reactores catalíticos con generación de calor.

BIBLIOGRAFÍA

- Achenbach E., Richter A. (1995). «Heat and Flow Characteristics of Packed Beds». En: *Experimental Thermal and Fluid Science* D-52425, pág. 2. URL: [file:///C:/Users/Juank/Downloads/Heat20and%20Flow%20Characteristics20of%20Packed%20Beds20\(1\).pdf](file:///C:/Users/Juank/Downloads/Heat20and%20Flow%20Characteristics20of%20Packed%20Beds20(1).pdf).
- AIEA. (2011). «Status report 72- Fixed Bed Nuclear Reactor (FBNR)». En: URL: <https://aris.iaea.org/sites/.5CPDF5CFBNR.pdf>.
- Banches E., Margeanu C. (2012). «Status of national participation in the INPRO Project of IAEA». En: URL: <http://www.nuclear.ro/conferencia/nuclear2012>.
- Bibb S., Palmer C. (2003). «Matemáticas Prácticas». En: pág. 388. URL: <http://www.worldcat.org/title/matematicas-practicas-aritmetica-algebra-geometria-trigonometria-y-regla-de-calculo/oclc/903656233>.
- Cajas H., Chávez I. (2015). «Determinación preliminar del flujo mínimo de refrigerante para la operación del núcleo del reactor fbnr (reactor nuclear de lecho fijo), a través de una simulación en un modelo digital validado experimentalmente en un lecho fijo a escala de laboratorio». En: *EPN*, pág. 76. URL: <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/11076/1/CD-6383.pdf>.
- Camacho F., Jurado E. (1985). «Pérdida de carga de líquidos en lechos empacados». En: *Universidad de Granada*, págs. 4-16. URL: <http://www.ugr.es/~fcamacho/Originales/Trabajos>.
- Casabó J., Gispert I., ed. (2007). *Estructura atómica y enlace químico*. Barcelona-España: Reverté.
- Catton I., Zhou F. (2012). «Internal heat transfer coefficient determination in a packed bed from the transient response». En: *Journal of Heat Transfer* 134, págs. 1-3. URL: https://www.researchgate.net/publication/234107839_Internal_Heat_Transfer_Coefficient_Determination_in_a_Packed_Bed_From_the_Transient_Response_Due_to_Solid_Phase_Induction_Heating.
- Choque E., Molina H. (2007). «Problemas de Transferencia de calor». En: pág. 23. URL: <http://es.slideshare.net/EstherSilvaGonsales/ejercicios-resueltos-50442296>.
- Coppiari N., Giubergia J. y Barbán G. (2011). «Consolidación de la nucleoelectricidad en el mundo». En: pág. 31. URL: <http://www.petrotecnica.com.ar/junio2011/sin/Consolidacion.pdf>.

- Corace J., Subidia S. (2009). «Mecanismos de transferencia de calor». En: págs. 3-10. URL: <http://ing.unne.edu.ar/pub/fisica2/U05.pdf>.
- Correa J., González N. (2002). «Graficos Estadisticos con R». En: *Universidad Nacional de Medellín*, págs. 70-120. URL: <ftp://cran.r-project.org/pub/R/doc/contrib/grafi3.pdf>.
- Dautzenberg A., Calis H. (2003). «CFD modelling and experimental validation of particle to fluid mass and heat transfer in a packed bed at very low channel to particle diameter ratio». En: *Chemical Engineering Journal* 69, págs. 3-13. URL: https://www.researchgate.net/publication/223778190_CFD_Modelling_and_Experimental_Validation_of_Particle-to-Fluid_Mass_and_Heat_Transfer_in_a_Packed_Bed_at_Very_Low_Channel_to_Particle_Diameter_Ratio.
- Diamandis P., Steven K., ed. (2013). *Abundancia el futuro es mejor de lo que piensas*. Barcelona – España: Antoni Bosch.
- DOE., GIF. (2002). «A technology roadmap for generation IV nuclear Energy Systems». En: *International Forum GIF 6*, pág. 15. URL: http://nuclear.inl.gov/gen4/docs/gen_iv_roadmap.pdf.
- Foro Nuclear., . (2015). «Situación de la energía nuclear». En: pág. 5. URL: <http://www.foronuclear.org/es/energia/2015>.
- Gallegos A ., Muñoz A. (2010). «Capa Límite». En: *Departamento de Ingeniería Mecánica F.I.M.E.E*, págs. 2-3. URL: http://www.fimee.ugto.mx/profesores/agallegos/documentos/Cap.9_Flujoviscosoexterno.pdf.
- Gonzáles L., Pérez S. (2010). «Reactores Nucleares de Cuarta Generación». En: pág. 5. URL: <http://almadeherrero.blogspot.com/2010/09/reactores-nucleares-de-cuarta.html>.
- Huk J., . (2014). «Movimiento de fluidos a través de lechos». En: págs. 2-4. URL: <https://drive.google.com/drive/folders/0B41rMgFcT8TpQIZzVEtYLUeYRzg..>
- IEA. (2014). «Wold Energy Outlook 2014». En: *International Energy Agency 20.2*, págs. 2-6. URL: https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WEO2014_ESSpanish.pdf.
- (2015a). «Key world energy statistics». En: *International Energy Agency 20.2*, pág. 24. URL: http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld_Statistics_2015.pdf.
- (2015b). «Wold Energy Outlook 2015». En: *International Energy Agency 20.2*, págs. 4-6. URL: https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WEO2015ES_SPANISH.pdf.

- Incropera F., De Witt D., ed. (1999). *Fundamentos de Transferencia de Calor*. México: PEARSON Learning.
- Jones D., Clarke D. y Abramowski T. (2012). «Mecánica de Fluidos Computacional. Aplicaciones Navales». En: pág. 54. URL: <http://tecnologia-maritima.blogspot.com/2012/08/mecanica-de-fluidos-computacional-cfd.html>.
- Kim M., Lim H. (2009). «Computational Fluid Dynamics Assessment of the Local Hot Core Temperature in a Pebble-Bed Type Very High Temperature Reactor». En: *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power* 131, págs. 12905-3. URL: <http://gasturbinespower.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1474534>.
- Kreith F., Manglik R., ed. (2012). *Principios de Transferencia de Calor*. México: CENGAGE Learning.
- Kunni D., Levenspiel O., ed. (2006a). *Fluidization Engineering*. Boston– USA: Elsevier.
- ed. (2006b). *Fluidization Engineering*. Boston-Estados Unidos: Elsevier.
- Lauzz S., Celi C. (2008). «Introducción a la transferencia de calor». En: págs. 73-77. URL: <http://es.slideshare.net/Lauuzz1122/deducciones-y-demostraciones-transferencia-de-calor>.
- López A., Martínez C. y Sánchez M. (2015). «Proyecto Educativo R». En: pág. 2. URL: <http://www.tutorialr.es/es/equipo.html>.
- Matsson J., Shih R., ed. (2013). *An Introduction to solidworks flow simulation*. Chicago – USA: SDC Publications.
- Micó F., . (2010). «Los sistemas nucleares del futuro». En: URL: <http://www.ciccp.es/revistaIT/textos/pdf/09.20Fernando20MicF3.pdf>.
- NEA. (2008). «Perspectivas sobre energía Nuclear». En: págs. 24-26. URL: <http://www.oecd-nea.org/neo/summaries/spanish.pdf>.
- (2012). «The Nuclear Energy Today». En: *Nuclear Energy Agency*. Pág. 54. URL: <http://www.oecd-nea.org/pub/nuclearenergytoday/6885-nuclear-energy-today.pdf>.
- Nemec D., Janez L. (2005). «Flow through packed bed reactors:1 Single phase flow». En: *Chemical Engineering Science*, págs. 2-4. URL: https://www.researchgate.net/profile/Janez_Levec/publication/223012735_Flow_Through_Packed_Bed_Reactors_1_Single_Phase_Flow/links/55e4062808aede0b5733d7ec.pdf.
- Neutrium. (2014). «Packed bed Reynolds Number». En: págs. 4-6. URL: https://neutrium.net/fluid_flow/packed-bed-reynolds-number/.
- Perera J., . (2004). «Impulso a la innovación». En: *Boletín IAEA*. URL: https://www.iaea.org/sites/default/files/46104794447_es.pdf.

- Rivas., C, ed. (2008). *Selección de materiales en el diseño de máquinas*. Barcelona – España: Edicions UPC.
- Rivas A., Moreno J. (2012). «Hidráulica lechos fijos». En: pág. 6. URL: bibing.us.es/proyectos/abreproy/4016/.../Memoria.
- Schwartz C., Smith J. (1953). «Flow Distribution in Packed Beds». En: *Ind. Eng. Chem.* 45.6, págs. 1209-1215. URL: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ie50522a025>.
- Sefidvash F., . (2010). «Non- Proliferation Resistance and Physical Protection of FBNR Nuclear Reactor». En: URL: http://www.sefidvash.net/publications/141_article.pdf.
- (2016). «Conceptual Design of the Fixed Bed Nuclear Reactor (FBNR) Concept». En: *IAEA 12960*, pág. 2. URL: <https://aris.iaea.org/sites/.5CPDF5CFBNR.pdf>.
- Senor D., Painter CL. (2007). «A new Innovative Spherical Cermet Nuclear Fuel Element to Achieve an Ultra Long Core Life for use in Grid Appropriate LWRs.» En: URL: <http://www.pnl.gov/publications/abstracts.asp?report=228043>.
- Spang A., Spuknik A. (2016). «Calc Steam». En: pág. 2. URL: http://www.peacesoftware.de/einigewerte/wasser_dampf_e.html.
- UNAN. (2005). «La energía Nuclear». En: *Universidad Autónoma de México*, pág. 4. URL: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/322/A4.pdf?sequence=4>.
- Wendt J., Anderson J. (2009). «Computational Fluid Dynamics, An Introduction». En: pág. 54. URL: <http://www.springer.com/us/book/9783540850557?token=prtst0416p>.
- Yang J., Wang J. (2012). «Experimental analysis of forced convective heat transfer in novel structured packed beds of particles». En: *Chemical Engineering Science* 71, pág. 127. URL: <http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=25927803>.
- Zambon M., Asensio D. (2008). «Análisis de perfiles radiales de temperatura para lechos fijos de baja relación de aspecto por fluidodinámica computacional». En: *Asociación Argentina de Mecánica Computacional*, pág. 1767-1784. URL: <http://www.cimec.org.ar/ojs/index.php/mc/article/viewFile/1519/1484>.
- Ziókowska I., Ziókowski D. (1988). «Fluid flow inside packed beds». En: *Chemical Engineering and Processing* 23.3, págs. 137-163. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0255270188800126>.

ANEXOS

ANEXOS

- A. Creación del modelo de simulación en COMSOL Multiphysics BCC 0.4 [m/s]
- B. Exportación de datos a formato txt
- C. Gráficos de estado físico y condiciones técnicas de simulación, arreglo FCC
- D. Base de datos de simulación
- E. Gráficos de estado físico y condiciones técnicas de simulación BCC
- F. Datos calculados, temperatura del fluido para FCC y BCC diferentes velocidades
- G. Propiedades termofísicas del fluido refrigerante
- H. Datos calculados, presión del fluido para estructuras FCC y BCC a diferentes velocidades

Anexo A

Creación del modelo de simulación en COMSOL Multiphysics

BCC 0.4 (m/s)

COMSOL Multiphysics tiene un entorno de interfaz de usuario que proporciona un gran alcance de diseño para el desarrollo de productos interdisciplinarios trabajando de forma unificada. A continuación se detalla los pasos necesarios para la creación de un modelo de simulación 3D.

1. Hacer uso del asistente de modelo .mph.
2. Seleccionar dimensión de espacio 3D.
3. Escoger el estudio que se desea realizar.
4. Conjuguar los estudios físicos, en este caso la transferencia de calor con la mecánica de fluidos.
5. Utilizar el constructor de modelo donde se realiza la geometría propuesta, se selecciona el tipo de material de los elementos involucrados y se introduce las condiciones iniciales y de frontera de los estudios multi físicos.
6. Crear un mallado de espesor normal recordando que un mallado extremadamente fino demanda de más tiempo de simulación.
7. Ir al asistente de calculo y observar la convergencia de resultados, si fuese necesario hacer modificaciones durante la simulación.
8. Migrar al módulo resultados donde se observa gráficos de estado físicos y los perfiles pre programados y seleccionados.

En las siguientes figuras se muestra el proceso de creación del modelo de simulación. Las Figuras A.1 y A.2 indican los primeros pasos para acceder a la interfaz del software.

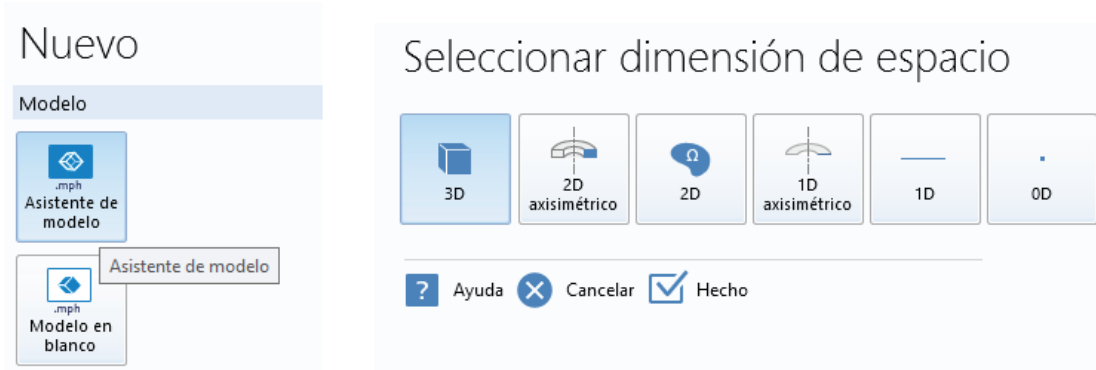


Figura A.1. Uso del asistente de modelo .mph.
(Fuente: Propia)

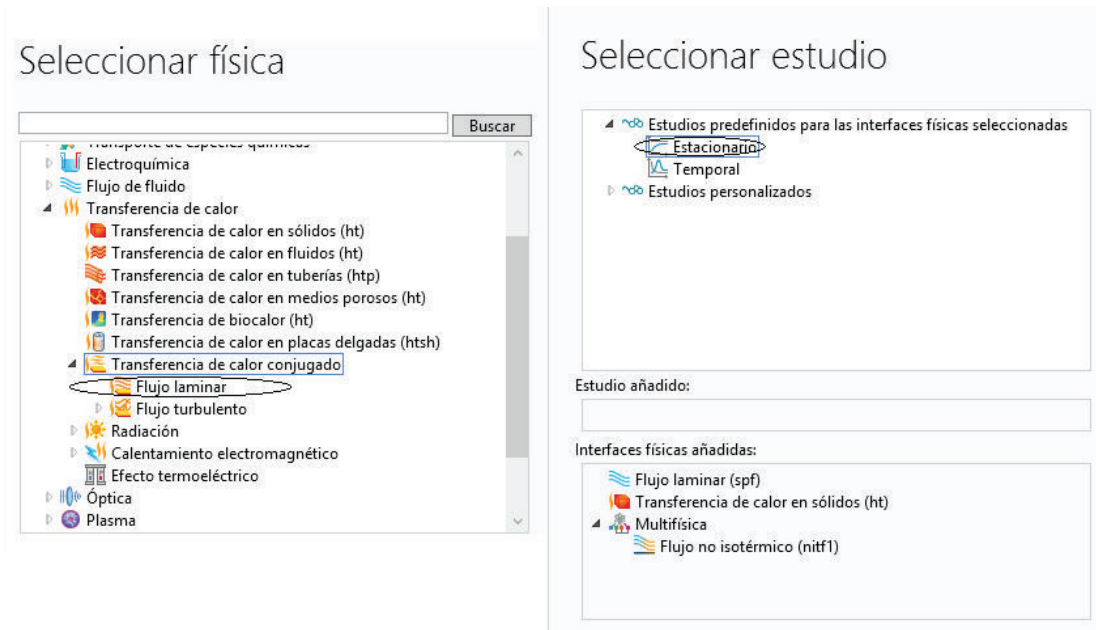


Figura A.2. Selección del estudio multi físico
(Fuente: Propia)

Luego de haber accedido a la interfaz interna del software se procede a a la creación de la geometría, introduciendo los datos como; las coordenadas de cada una de las esferas, diámetro de las esferas y dimensiones del lecho del reactor nuclear, luego de este proceso se introduce los datos de material como son los del refrigerante y del material nuclear, las propiedades son ingresadas manualmente, estos valores han sido definidos en el Capítulo II, Figuras A.3 y A.4

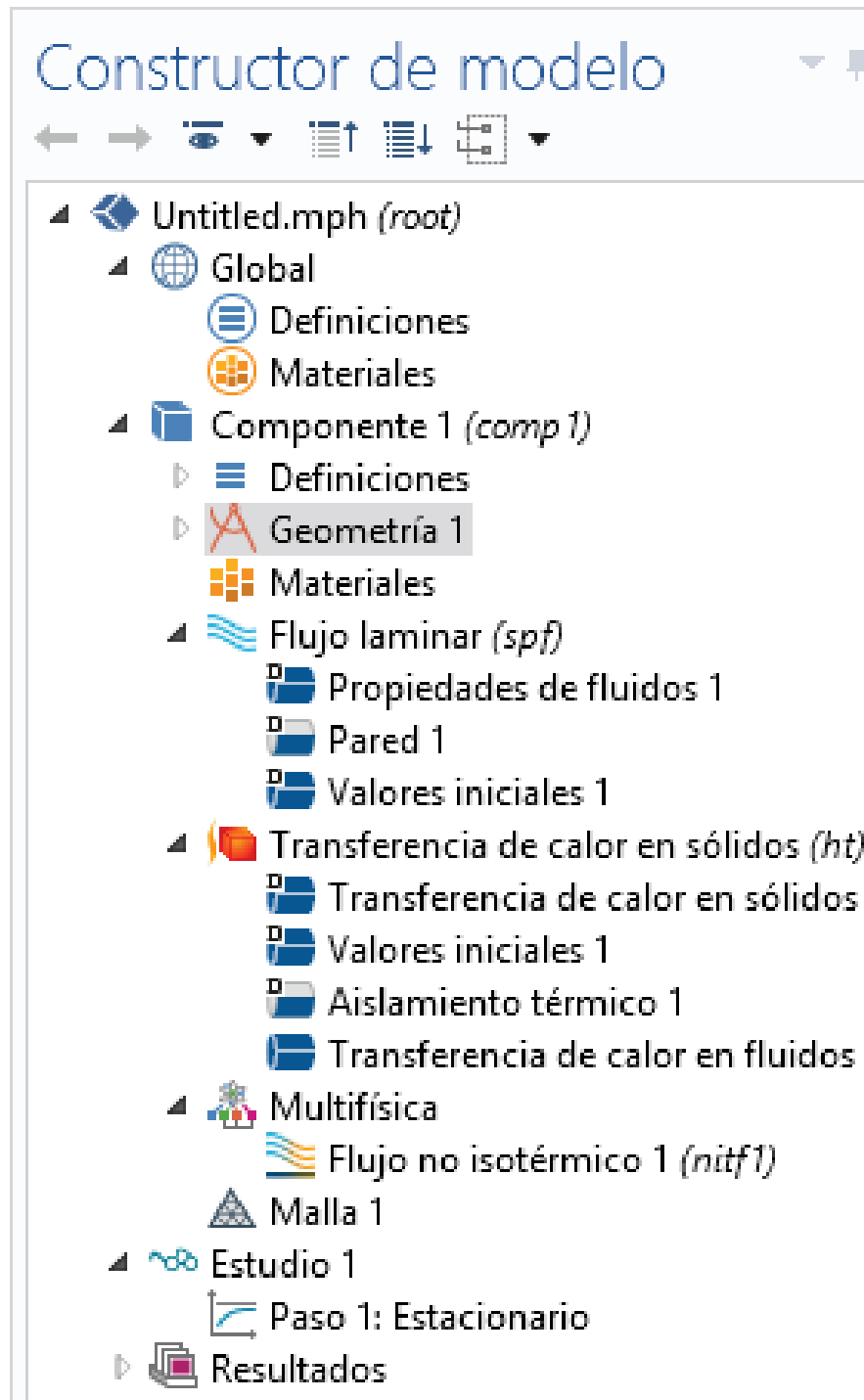


Figura A.3. Parámetros geométricos
(Fuente: Propia)

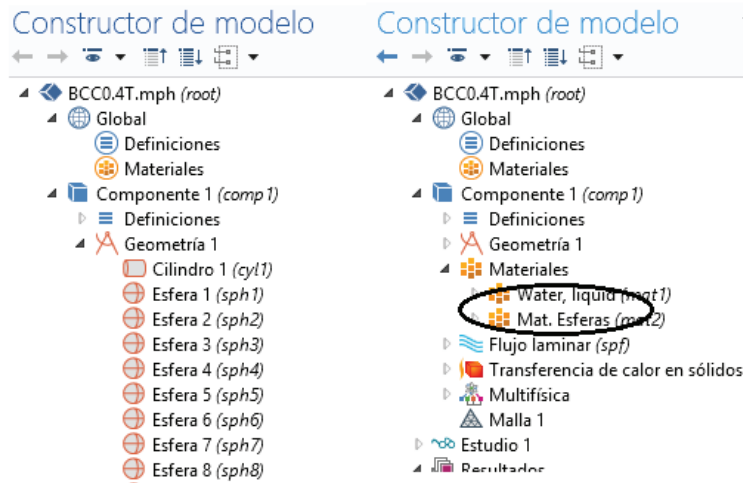


Figura A.4. Selección y creación de las propiedades de los materiales
(Fuente: Propia)

La introducción de valores límites y condiciones de borde es parte fundamental de la simulación debido a que si estos valores no están próximos a las iteraciones la simulación difícilmente va a converger. Es por este motivo que estos valores han sido precalculados y otros son requerimientos del diseño original del reactor nuclear, Figuras A.5 y A.6.

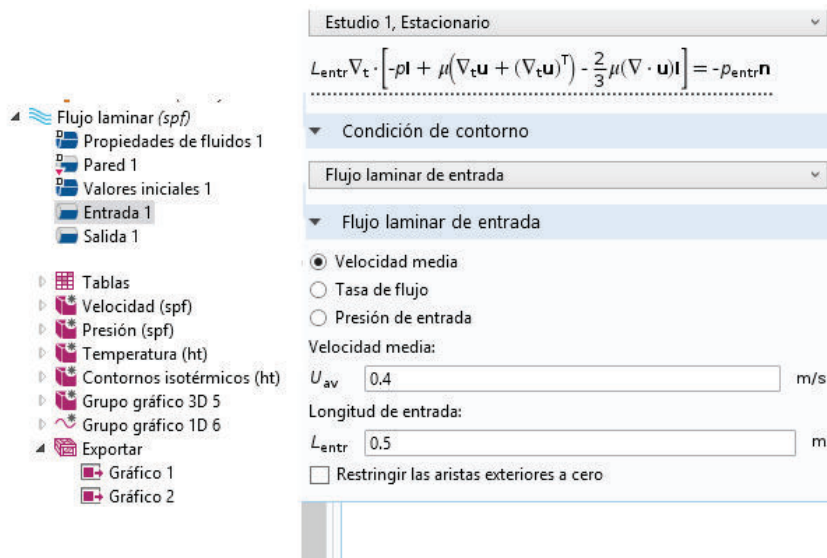


Figura A.5. Introducción de condiciones de borde, velocidad del fluido
(Fuente: Propia)

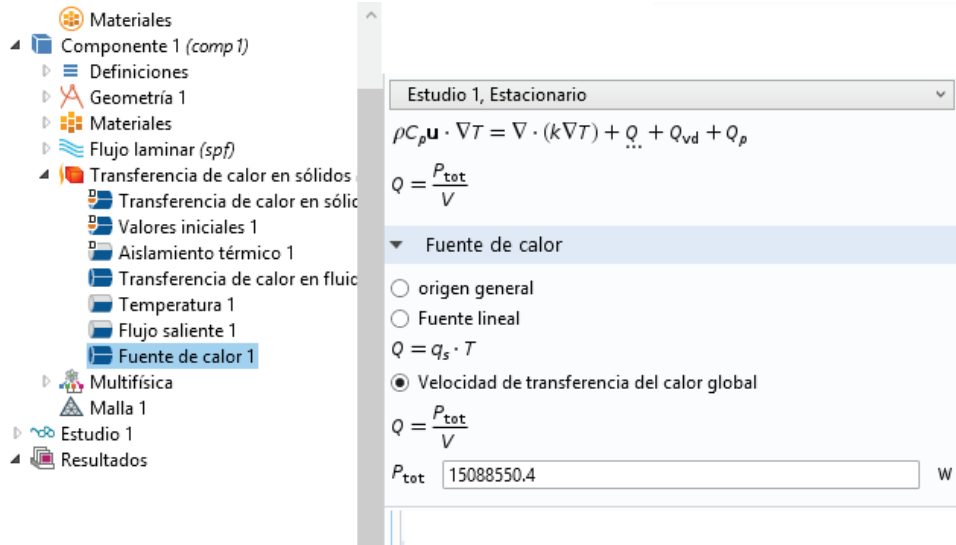


Figura A.6. Introducción de condiciones de borde, generación de calor (Fuente: Propia)

El mallado de los elementos internos y externos del lecho del reactor deben ser de un tamaño normal, hacer un mallado extremadamente fino demanda de tiempo de simulación, así también los resultados son parecidos y carecen de diferencia relativa, Figura A.7. Por otro lado los gráficos de estado físico que se observan del estudio son los de temperatura, presión y velocidad, Figura A.8

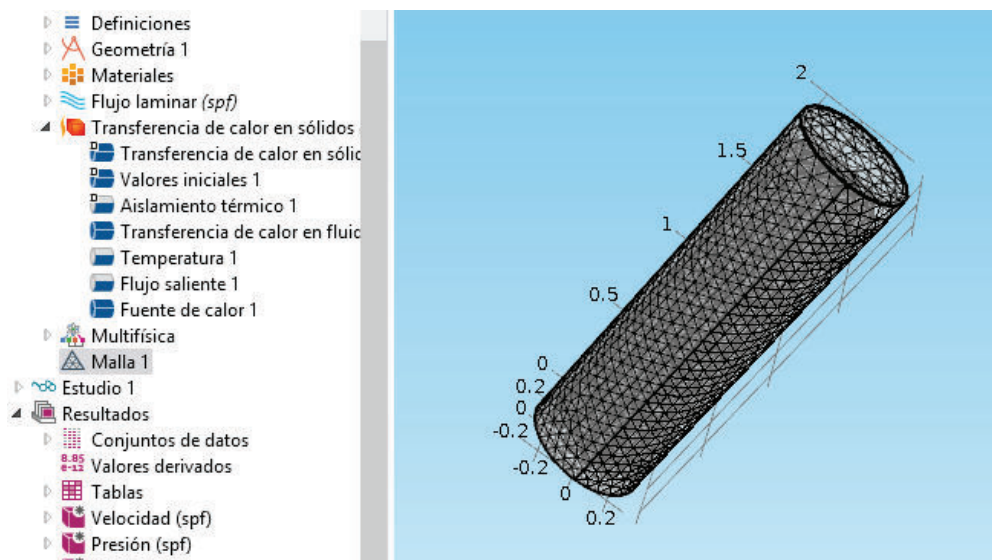


Figura A.7. Mallado del lecho (Fuente: Propia)

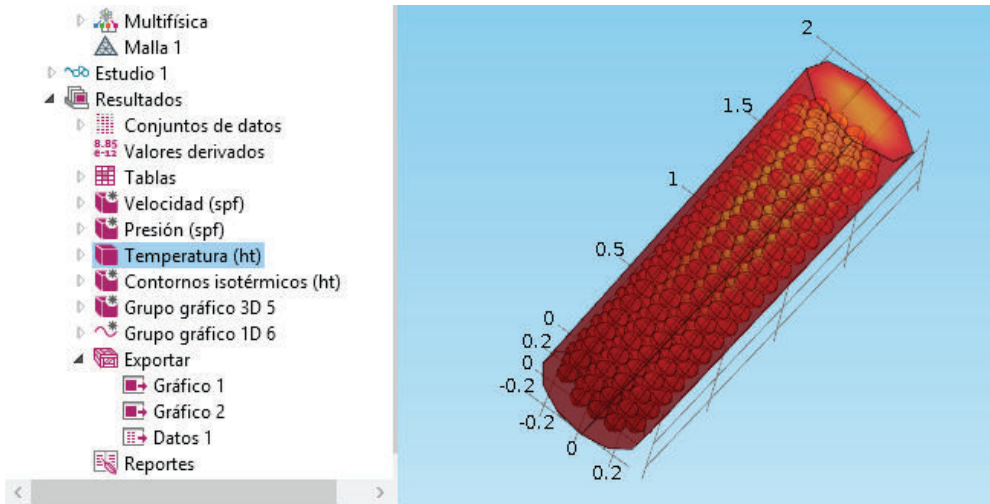


Figura A.8. Representación de la transferencia de calor
(Fuente: Propia)

En la Figura A.9 se observa los perfiles de temperatura de las esferas a lo largo del lecho del reactor estos valores luego son exportados en formato `txt` para ser analizados de forma independiente.

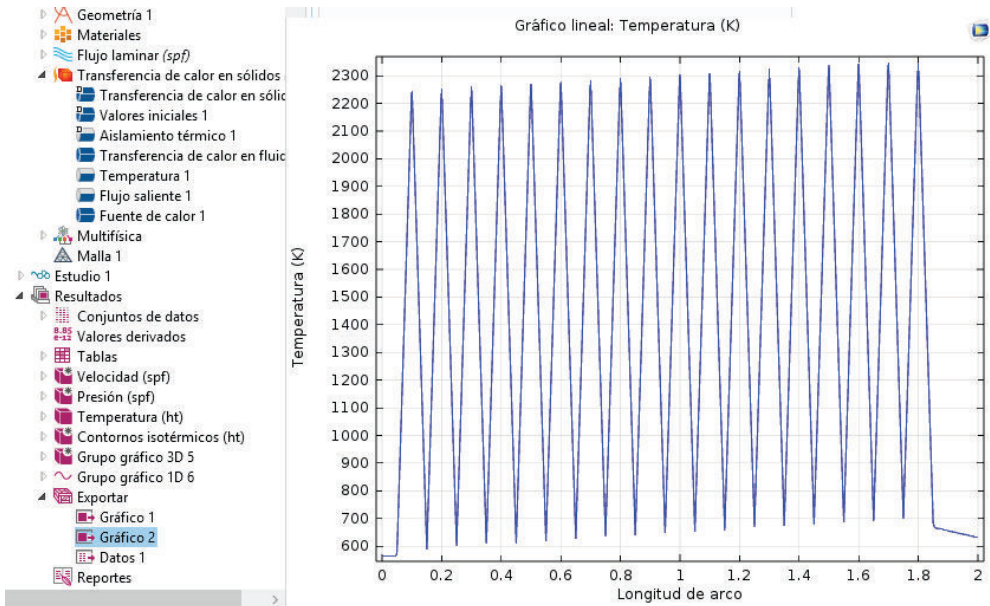


Figura A.9. Obtención de resultados
(Fuente: Propia)

Anexo B

Exportación de datos a formato txt

Las curvas que COMSOL muestra en su interfaz gráfica pueden extraerse en formato `txt` donde posteriormente se analizan con el software **R**, para obtener la base de datos se procede hacer los siguientes pasos:

1. En la ventana de COMSOL en conjunto de datos se crea una línea que atraviese en su totalidad al lecho.
2. Seleccionar los datos que se quiere extraer como son: datos de temperatura del fluido, temperatura de la esfera y presión del fluido Vs la longitud del lecho.
3. Crear el perfil y luego exportar los datos.

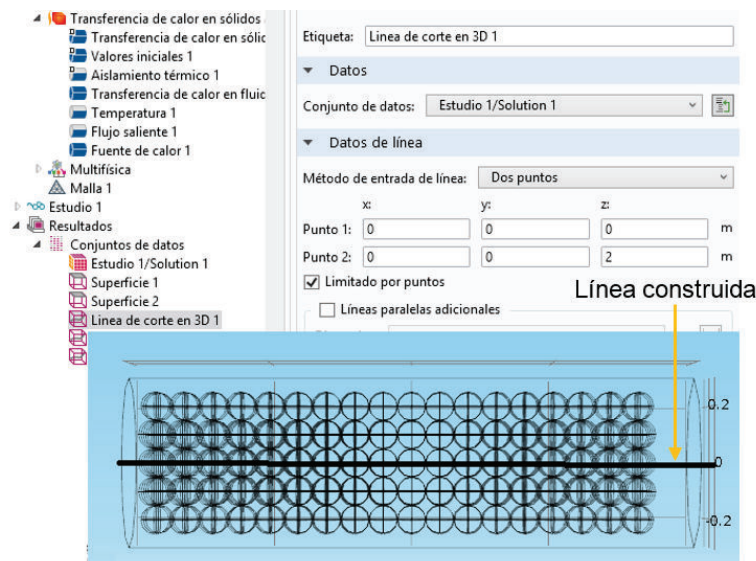


Figura B.1. Creación de línea de extracción de datos
(Fuente: Propia)

La creación de la línea imaginaria que atraviesa el lecho del reactor a lo largo del mismo sirve para poder extraer los datos de temperatura y presión, esta línea imaginaria ayuda incluso a la creación de los perfiles de estudio, FiguraB.1.

Después de haber creado la línea de extracción se crea una base de datos en COMSOL en el módulo Exportar, ahí se selecciona las expresiones y unidades requeridas tomando en

cuenta que datos van a migrar al eje x y eje y , Figura B.2

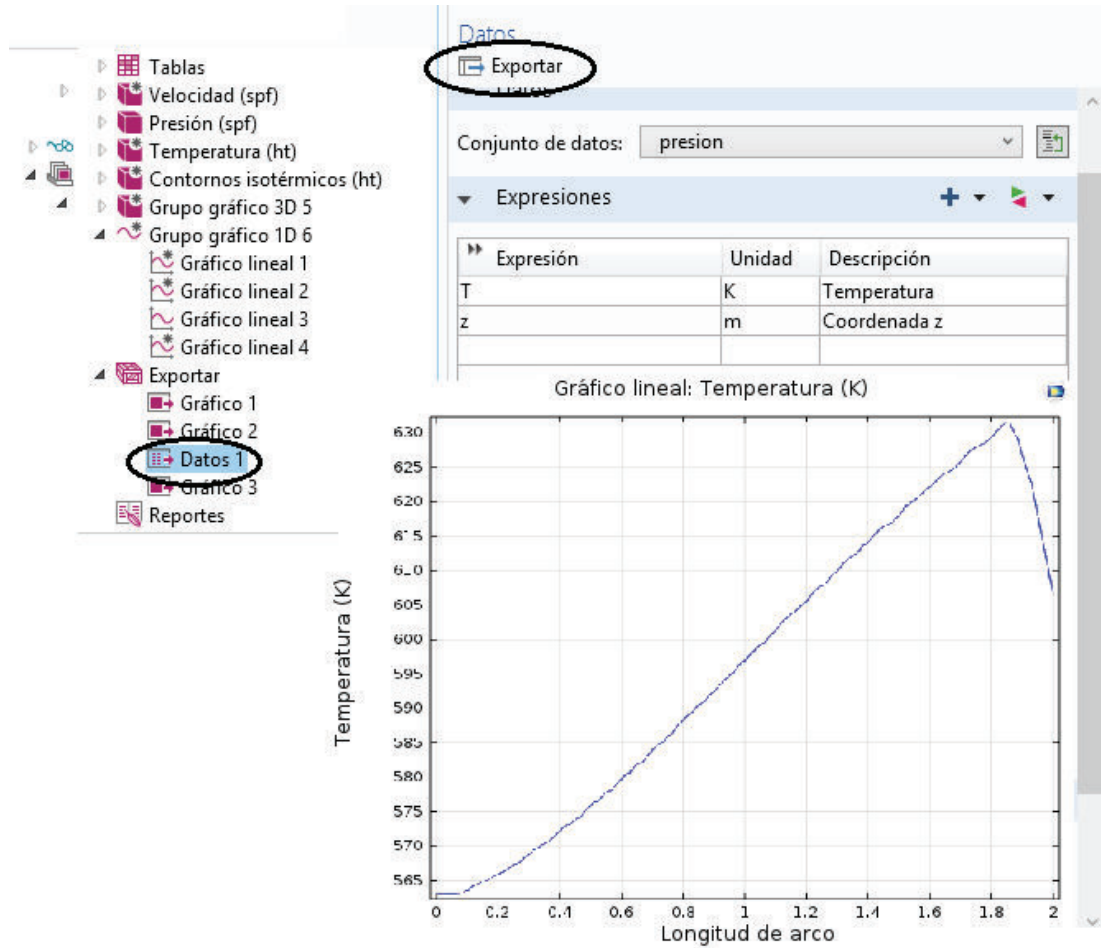


Figura B.2. Exportación de datos
(Fuente: Propia)

Luego de efectuar los pasos antes mencionados se habrá una ventana donde indica en que carpeta se va a guardar la base de datos. Los datos se encuentra en completo desorden por lo que es necesario ordenar los mismos con ayuda del EXCEL, Figuras B.3, B.4

```

0.6TF - Notepad
File Edit Format View Help
% Model: BCC0.6T.mph% Version: COMSOL 5.0.0.243% Date: Nov 5 2016, 18:11% Dimer
5 0.40625 0.41875 0.43125 0.44375
25 0.91875 0.93125 0.94375 0.95625
875 1.43125 1.44375 1.45625 1.46875
3125 1.94375 1.95625 1.96875 1.98125
62753 573.6373909619193 573.9851453539856 574.3169276589128 574.9563878341945 575.
9753478 594.933029899869 595.4262309252468 596.2834962145814 596.7241794131626 597.
29277947 616.6972461629064 617.189785421768 617.7536552598797 618.4137450275887 619.
6060918 610.7990298622485 607.902899115317% Data% z (m)0.00625000000000001 0.01874999999999999
0.48125 0.49375 0.50625 0.51875 0.53125
0.99375 1.00625 1.01875 1.03125 1.04375
1.50625 1.51875 1.53125 1.54375 1.5562500000000000
09375 0.10625 0.11875 0.13125 0.14375
0.60625 0.61875 0.63125 0.64375 0.65625
1.11875 1.13125 1.14375 1.15625 1.16875
1.63125 1.64375 1.65625 1.66875 1.68125
4.4057714124629 564.690329956526 564.9034963574926 565.0423254930529 565.4817034274748
581.603645216189 581.9863516744556 582.1872767808306 582.8966786258081 583.56207623699
603.8692169188722 604.2379047728806 604.8582327794123 605.2873509123749 605.912742976
624.5483967445587 624.9448302676943 625.4939925541807 626.2093448505319 626.98044421
0.18125 0.193749999999999998 0.20625 0.21875 0.23125
0.69375 0.70625 0.71875 0.73125 0.74375
1.20625 1.21875 1.23125 1.24375 1.25625
1.71875 1.73125 1.74375 1.75625 1.76875

```

Figura B.3. Creación de la base de datos
(Fuente: Propia)

```

0.4TF - Notepad
File Edit Format View Help
% Model: BCC0.4T.mph
% Version: COMSOL 5.0.0.243
% Date: Sep 6 2016, 16:54
% Dimension: 1
% Nodes: 160
% Expressions: 2
% Description: Temperatura, Coordenada z
% Grid
0,00625 0,01875 0,03125 0,04375 0,05625 0,06875 0,08125 0,09375 0,10625 0,11875 0,13125 0,14375 0,15625 0,16875 0,181
1,60625 1,61875 1,63125 1,64375 1,65625 1,66875 1,68125 1,69375 1,70625 1,71875 1,73125 1,74375 1,75625 1,76875 1,781
% Data
% T (K)
563,0025183 563,0116844 563,0224521 563,0311809 563,0560439 563,174215 563,3034064 563,
619,3454726 619,9514714 620,79557 621,9752131 622,7762093 623,5772055 624,165961 624,
% Data
% z (m)
0,00625 0,01875 0,03125 0,04375 0,05625 0,06875 0,08125 0,09375 0,10625 0,11875 0,13125 0,14375 0,15625 0,16875 0,181
1,60625 1,61875 1,63125 1,64375 1,65625 1,66875 1,68125 1,69375 1,70625 1,71875 1,73125 1,74375 1,75625 1,76875 1,781

563,0025183 1 563,00 563.00 563.00, 563,0025183
563,0116844 1 563,01 563.01 563.01, 563,0116844
563,0224521 1 563,02 563.02 563.02, 563,0224521
563,0311809 1 563,03 563.03 563.03, 563,0311809
563,0560439 1 563,05 563.05 563.05, 563,0560439

```

Figura B.4. Base de datos ordenada
(Fuente: Propia)

Anexo C

Gráficos de estado físico y condiciones técnicas de simulación, arreglo FCC

Las Tablas: C.1, C.2, C.3 y Figuras: C.1, C.2, C.3, C.4, C.5, C.6, C.7, C.8, C.9 de estado físico evidencian el trabajo de las corridas de simulación para distintas velocidades.

Tabla C.1. Características técnicas de la simulación, FCC 0.6 [m/s]

Ítem	Propiedades
Modelo	FCC 0.6.mph COMSOL 5.0.0.243
Nodos	1200
Tiempo de estudio	37 h, 33 min, 13 s
Cantidad de esferas	342

Fuente: Propia

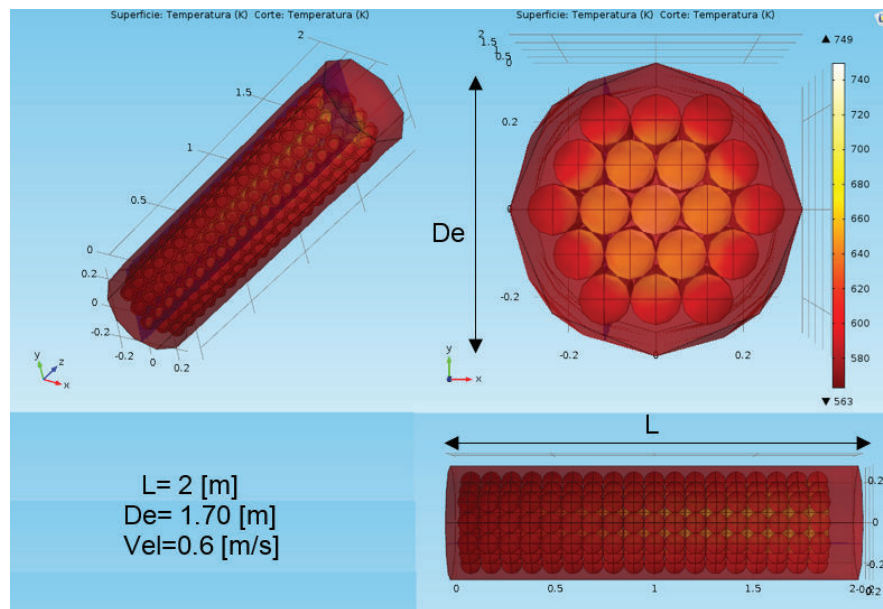


Figura C.1. Temperatura, arreglo FCC, velocidad 0.6 [m/s]
(Fuente: Propia)

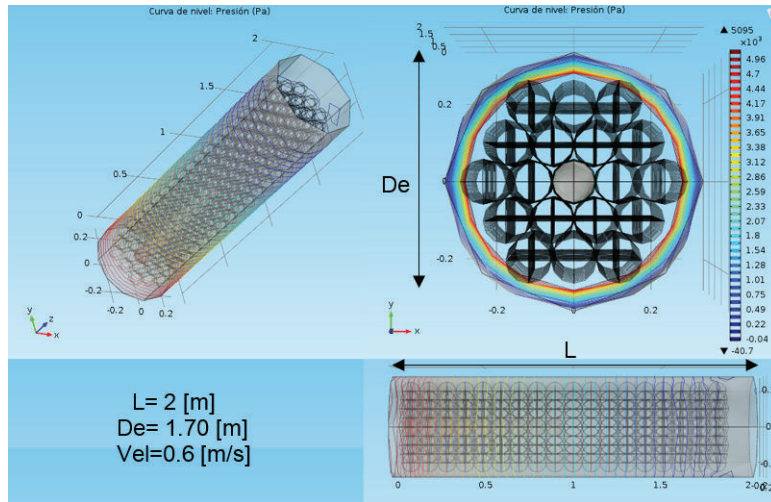


Figura C.2. Presión, arreglo FCC, velocidad 0.6 [m/s]
(Fuente: Propia)

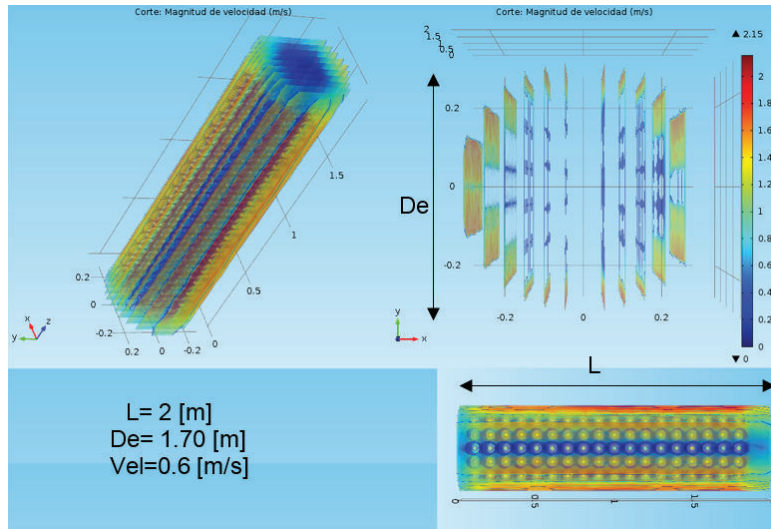


Figura C.3. Arreglo FCC, velocidad 0.6 [m/s]
(Fuente: Propia)

Tabla C.2. Características técnicas de la simulación, FCC 0.8 [m/s]

Ítem	Propiedades
Modelo	FCC 0.8.mph COMSOL 5.0.0.243
Nodos	1200
Tiempo de estudio	35 h, 33 min, 53 s
Cantidad de esferas	342

Fuente: Propia

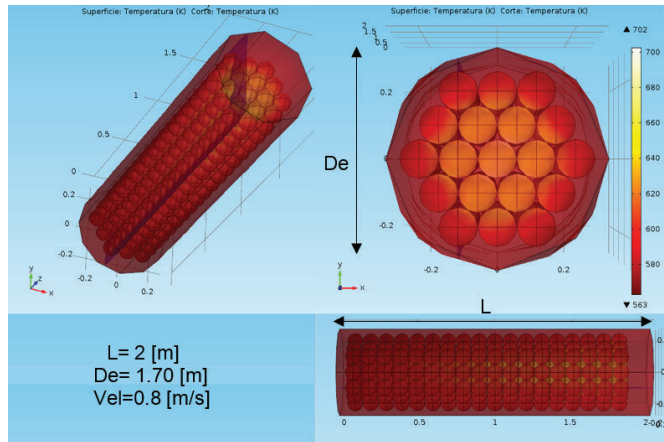


Figura C.4. Temperatura, arreglo FCC, velocidad 0.8 [m/s]
(Fuente: Propia)

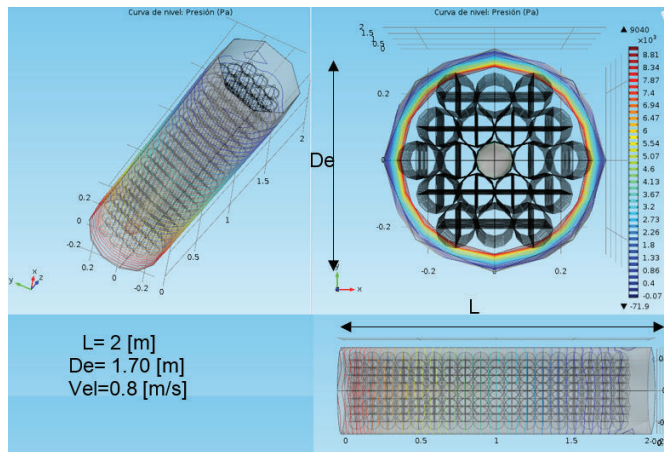


Figura C.5. Presión, arreglo FCC, velocidad 0.8 [m/s]
(Fuente: Propia)

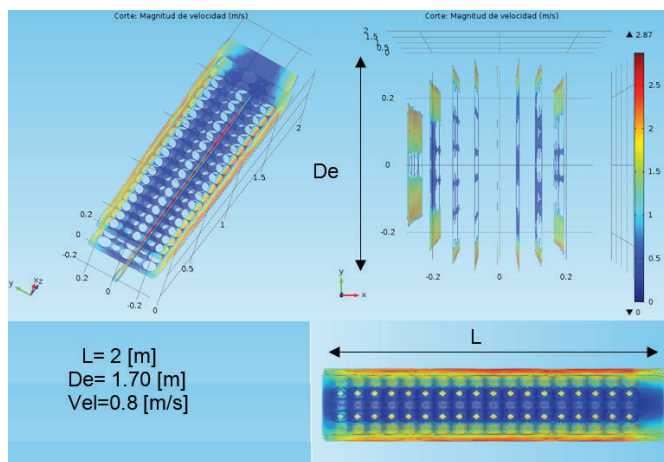


Figura C.6. Arreglo FCC, velocidad 0.8 [m/s]
(Fuente: Propia)

Tabla C.3. Características técnicas de la simulación, FCC 1 [m/s]

Ítem	Propiedades
Modelo	FCC 1.mph COMSOL 5.0.0.243
Nodos	1200
Tiempo de estudio	35 h, 40 min, 5 s
Cantidad de esferas	342

Fuente: Propia

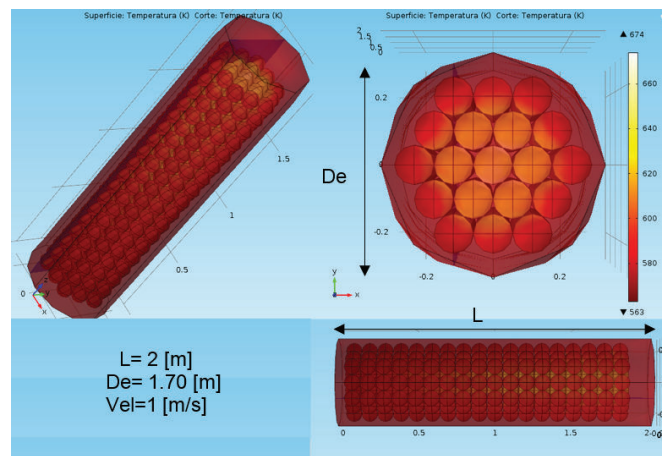


Figura C.7. Temperatura, arreglo FCC, velocidad 1 [m/s]
(Fuente: Propia)

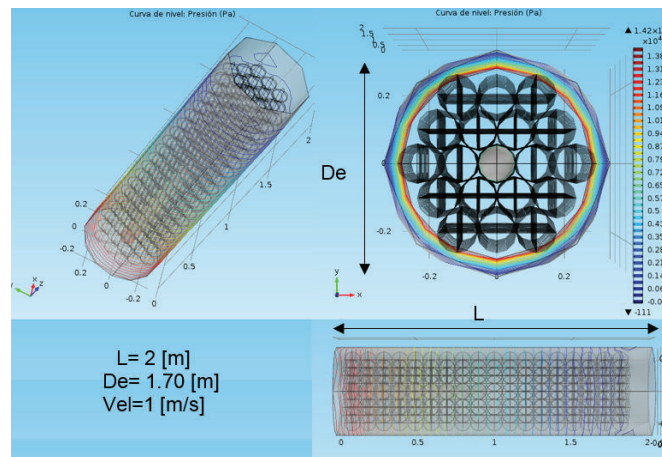


Figura C.8. Presión, arreglo FCC, velocidad 1 [m/s]
(Fuente: Propia)

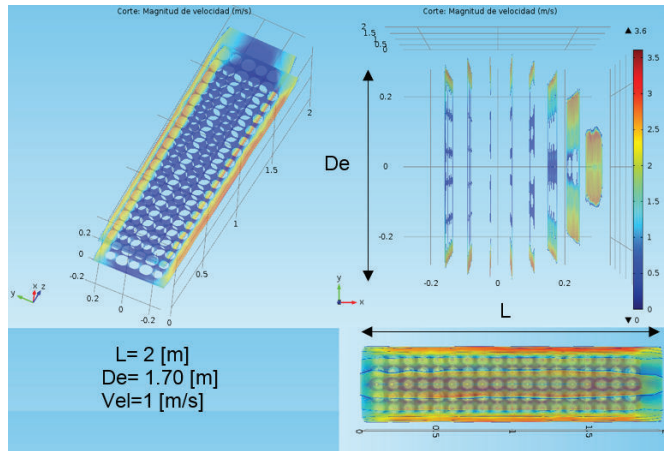


Figura C.9. Arreglo FCC, velocidad 1 [m/s]
(Fuente: Propia)

Anexo D

Base de datos de simulación

La recolección de datos es parte fundamental para el análisis y tratamiento, llevarlo a cabo implica el uso y manipulación de 9600 datos de temperatura y presión. Para llegar a este objetivo se realizó los siguientes pasos:

1. Extracción y ordenamiento de datos mediante el uso de EXCEL
2. Introducción de datos en el software R
3. Creación de diferentes plantillas de análisis

Los formatos `txt` que el COMSOL arroja son abiertos con Excel así se observa en la Figura D.1

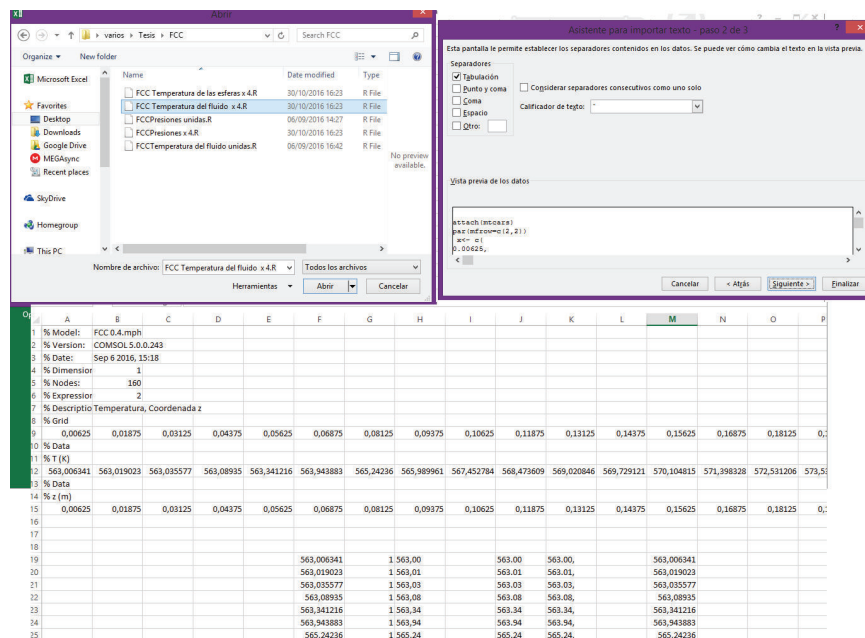


Figura D.1. Ordenamiento de datos con Excel
(Fuente: Propia)

Una vez que han sido ordenados los datos se los copia y pega en la interfaz de R, Figura D.2 . Los datos obtenidos se presenta en la siguiente Tabla D.1

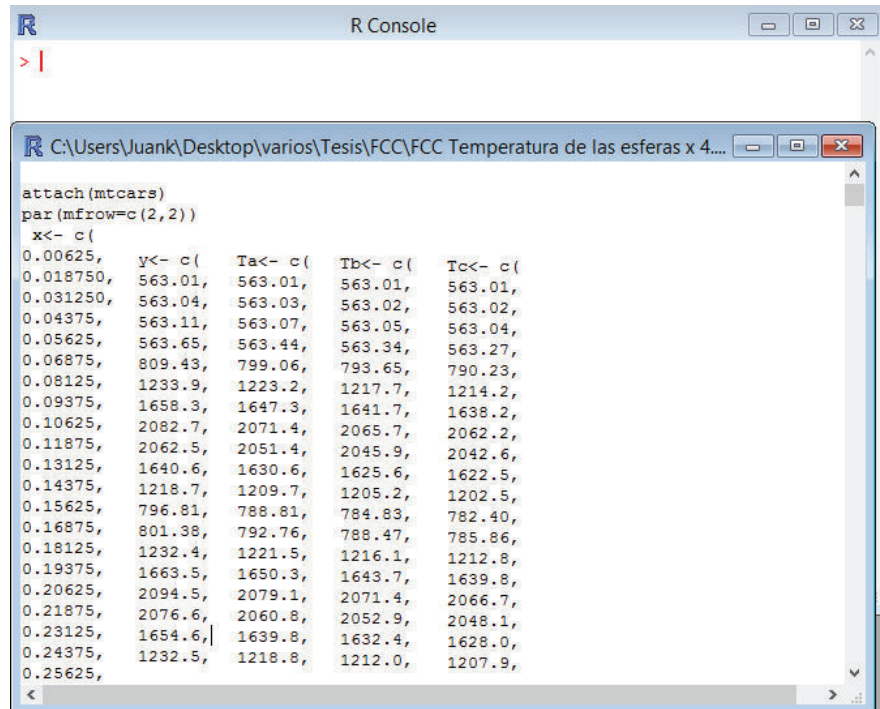


Figura D.2. Introducción de datos en R
(Fuente: Propia)

Tabla D.1. Base de datos simulada, perfil de temperatura del fluido para arreglo FCC, diferentes velocidades

	0.4 [m/s]	0.6 [m/s]	0.8 [m/s]	1 [m/s]
Longitud [m]	Temperatura [°K]			
L<- c(	Ta<- c(	Tb<- c(	Tc<- c(	Td<- c(
0.00625,	563.00,	563.00,	563.00,	563.00,
0.018750,	563.01,	563.01,	563.01,	563.00,
0.031250,	563.03,	563.02,	563.01,	563.01,
0.04375,	563.08,	563.06,	563.04,	563.03,
0.05625,	563.34,	563.23,	563.17,	563.14,
0.06875,	563.94,	563.63,	563.48,	563.39,
0.08125,	565.24,	564.51,	564.14,	563.92,
0.09375,	565.98,	565.01,	564.52,	564.22,
0.10625,	567.45,	566.00,	565.27,	564.82,
0.11875,	568.47,	566.70,	565.81,	565.26,
0.13125,	569.02,	567.07,	566.09,	565.49,
Continua en la siguiente página				

Longitud [m]	T [°K]	T [°K]	T [°K]	T [°K]
0.14375,	569.72,	567.55,	566.45,	565.78,
0.15625,	570.10,	567.79,	566.64,	565.93,
0.16875,	571.39,	568.65,	567.28,	566.44,
0.18125,	572.53,	569.40,	567.84,	566.89,
0.19375,	573.53,	570.07,	568.34,	567.29,
0.20625,	575.34,	571.29,	569.27,	568.03,
0.21875,	576.72,	572.23,	569.98,	568.61,
0.23125,	577.44,	572.71,	570.35,	568.91,
0.24375,	578.46,	573.39,	570.86,	569.32,
0.25625,	578.87,	573.66,	571.06,	569.48,
0.26875,	580.53,	574.76,	571.88,	570.12,
0.28125,	581.96,	575.70,	572.58,	570.68,
0.29375,	583.30,	576.59,	573.25,	571.22,
0.30625,	585.67,	578.18,	574.44,	572.17,
0.31875,	587.27,	579.26,	575.26,	572.83,
0.33125,	588.06,	579.79,	575.66,	573.16,
0.34375,	589.09,	580.48,	576.18,	573.57,
0.35625,	589.64,	580.84,	576.44,	573.78,
0.36875,	591.58,	582.12,	577.39,	574.53,
0.38125,	593.25,	583.22,	578.21,	575.18,
0.39375,	594.58,	584.10,	578.87,	575.70,
0.40625,	596.84,	585.61,	580.01,	576.61,
0.41875,	598.49,	586.73,	580.85,	577.29,
0.43125,	599.43,	587.36,	581.32,	577.67,
0.44375,	600.75,	588.23,	581.97,	578.19,
0.45625,	601.26,	588.57,	582.23,	578.40,
0.46875,	603.28,	589.91,	583.22,	579.19,
0.48125,	605.09,	591.10,	584.11,	579.89,
0.49375,	606.56,	592.08,	584.84,	580.47,
0.50625,	608.98,	593.70,	586.06,	581.44,

Continua en la siguiente página

Longitud [m]	T [°K]	T [°K]	T [°K]	T [°K]
0.51875,	610.62,	594.80,	586.89,	582.11,
0.53125,	611.49,	595.38,	587.32,	582.45,
0.54375,	612.58,	596.10,	587.86,	582.88,
0.55625,	613.43,	596.66,	588.28,	583.21,
0.56875,	615.42,	597.97,	589.24,	583.98,
0.58125,	617.16,	599.11,	590.09,	584.64,
0.59375,	618.54,	600.03,	590.77,	585.19,
0.60625,	620.91,	601.62,	591.97,	586.14,
0.61875,	622.62,	602.77,	592.84,	586.84,
0.63125,	623.65,	603.47,	593.36,	587.26,
0.64375,	624.90,	604.29,	593.98,	587.75,
0.65625,	625.42,	604.63,	594.23,	587.95,
0.66875,	627.34,	605.90,	595.17,	588.69,
0.68125,	628.86,	606.89,	595.90,	589.27,
0.69375,	630.36,	607.89,	596.64,	589.86,
0.70625,	632.97,	609.64,	597.96,	590.91,
0.71875,	634.66,	610.77,	598.81,	591.59,
0.73125,	635.51,	611.35,	599.25,	591.94,
0.74375,	636.52,	612.02,	599.75,	592.34,
0.75625,	637.27,	612.51,	600.11,	592.63,
0.76875,	639.40,	613.92,	601.16,	593.46,
0.78125,	640.88,	614.89,	601.87,	594.02,
0.79375,	642.35,	615.86,	602.60,	594.59,
0.80625,	645.01,	617.64,	603.94,	595.66,
0.81875,	646.68,	618.76,	604.77,	596.33,
0.83125,	647.48,	619.29,	605.18,	596.66,
0.84375,	648.75,	620.14,	605.81,	597.16,
0.85625,	649.34,	620.52,	606.09,	597.38,
0.86875,	651.41,	621.89,	607.11,	598.18,
0.88125,	652.91,	622.86,	607.82,	598.74,

Continua en la siguiente página

Longitud [m]	T [°K]	T [°K]	T [°K]	T [°K]
0.89375,	654.35,	623.82,	608.53,	599.31,
0.90625,	657.07,	625.64,	609.90,	600.40,
0.91875,	658.77,	626.78,	610.75,	601.08,
0.93125,	659.61,	627.34,	611.18,	601.42,
0.94375,	660.81,	628.14,	611.77,	601.89,
0.95625,	661.33,	628.48,	612.02,	602.09,
0.96875,	663.38,	629.83,	613.02,	602.88,
0.98125,	665.00,	630.88,	613.80,	603.49,
0.99375,	666.49,	631.87,	614.54,	604.08,
1.0063,	669.20,	633.69,	615.90,	605.17,
1.0188,	670.89,	634.82,	616.75,	605.85,
1.0313,	671.75,	635.40,	617.19,	606.20,
1.0438,	672.96,	636.20,	617.79,	606.67,
1.0563,	673.50,	636.55,	618.04,	606.88,
1.0688,	675.53,	637.89,	619.03,	607.66,
1.0813,	677.07,	638.89,	619.77,	608.24,
1.0938,	678.42,	639.78,	620.44,	608.77,
1.1063,	680.91,	641.46,	621.70,	609.78,
1.1188,	682.45,	642.50,	622.49,	610.41,
1.1313,	683.28,	643.06,	622.91,	610.75,
1.1437,	684.20,	643.67,	623.36,	611.11,
1.1563,	684.99,	644.19,	623.75,	611.42,
1.1688,	686.97,	645.49,	624.72,	612.19,
1.1813,	688.41,	646.43,	625.41,	612.73,
1.1938,	689.69,	647.28,	626.04,	613.23,
1.2063,	692.07,	648.89,	627.25,	614.20,
1.2188,	693.54,	649.88,	628.00,	614.80,
1.2312,	694.24,	650.35,	628.36,	615.09,
1.2438,	695.11,	650.93,	628.79,	615.43,
1.2563,	695.92,	651.46,	629.19,	615.75,

Continua en la siguiente página

Longitud [m]	T [°K]	T [°K]	T [°K]	T [°K]
1.2688,	697.84,	652.73,	630.13,	616.49,
1.2813,	699.18,	653.60,	630.76,	616.99,
1.2938,	700.40,	654.41,	631.37,	617.47,
1.3063,	702.69,	655.95,	632.53,	618.41,
1.3188,	704.07,	656.88,	633.23,	618.97,
1.3313,	704.74,	657.33,	633.57,	619.24,
1.3438,	705.64,	657.93,	634.02,	619.59,
1.3563,	706.28,	658.36,	634.33,	619.84,
1.3688,	708.20,	659.62,	635.27,	620.59,
1.3813,	709.34,	660.37,	635.82,	621.02,
1.3938,	710.48,	661.13,	636.39,	621.47,
1.4062,	712.59,	662.55,	637.46,	622.33,
1.4188,	713.88,	663.41,	638.11,	622.85,
1.4313,	714.41,	663.77,	638.38,	623.06,
1.4438,	715.17,	664.27,	638.75,	623.36,
1.4563,	715.87,	664.74,	639.10,	623.63,
1.4688,	717.84,	666.04,	640.07,	624.40,
1.4813,	719.01,	666.81,	640.63,	624.84,
1.4938,	720.27,	667.65,	641.26,	625.35,
1.5063,	722.36,	669.05,	642.32,	626.19,
1.5188,	723.61,	669.88,	642.94,	626.69,
1.5313,	724.13,	670.24,	643.21,	626.90,
1.5437,	725.09,	670.87,	643.68,	627.28,
1.5563,	725.82,	671.35,	644.03,	627.55,
1.5688,	727.96,	672.77,	645.09,	628.39,
1.5813,	729.29,	673.64,	645.73,	628.89,
1.5938,	730.49,	674.43,	646.32,	629.36,
1.6063,	732.67,	675.90,	647.42,	630.24,
1.6188,	734.06,	676.83,	648.12,	630.80,
1.6313,	734.69,	677.25,	648.44,	631.05,

Continua en la siguiente página

Longitud [m]	T [°K]	T [°K]	T [°K]	T [°K]
1.6437,	735.72,	677.93,	648.94,	631.45,
1.6563,	736.05,	678.15,	649.10,	631.58,
1.6688,	737.88,	679.35,	649.99,	632.28,
1.6813,	739.09,	680.14,	650.57,	632.74,
1.6938,	740.37,	680.99,	651.21,	633.25,
1.7063,	742.56,	682.46,	652.32,	634.13,
1.7188,	743.86,	683.34,	652.98,	634.66,
1.7313,	744.35,	683.67,	653.23,	634.86,
1.7438,	745.21,	684.23,	653.65,	635.19,
1.7563,	745.76,	684.60,	653.92,	635.41,
1.7688,	747.59,	685.81,	654.82,	636.12,
1.7813,	748.86,	686.64,	655.43,	636.60,
1.7938,	749.68,	687.18,	655.84,	636.93,
1.8063,	750.94,	688.04,	656.48,	637.44,
1.8188,	750.12,	687.51,	656.10,	637.14,
1.8313,	743.80,	683.34,	653.00,	634.70,
1.8438,	730.60,	674.64,	646.56,	629.62,
1.8562,	715.26,	664.51,	639.04,	623.68,
1.8688,	705.37,	657.94,	634.14,	619.78,
1.8813,	695.48,	651.37,	629.24,	615.89,
1.8938,	685.04,	644.43,	624.06,	611.77,
1.9063,	674.22,	637.24,	618.68,	607.50,
1.9188,	663.40,	630.05,	613.31,	603.22,
1.9313,	652.15,	622.55,	607.69,	598.75,
1.9437,	640.69,	614.90,	601.95,	594.17,
1.9563,	636.61,	612.17,	599.90,	592.52,
1.9688,	634.09,	610.48,	598.63,	591.49,
1.9813,	631.57,	608.79,	597.35,	590.47,
1.9938)	629,05)	607,09)	596,08)	589,44)

Tabla D.2. Base de datos simulada, perfil de temperatura de las esferas para arreglo FCC, diferentes velocidades

	0.4 [m/s]	0.6 [m/s]	0.8 [m/s]	1 [m/s]
Longitud [m]	Temperatura [°K]			
L<- c(	Ta<- c(	Tb<- c(	Tc<- c(	Td<- c(
0.00625,	563.01,	563.01,	563.01,	563.01,
0.018750,	563.04,	563.03,	563.02,	563.02,
0.031250,	563.11,	563.07,	563.05,	563.04,
0.04375,	563.65,	563.44,	563.34,	563.27,
0.05625,	809.43,	799.06,	793.65,	790.23,
0.06875,	1233.9,	1223.2,	1217.7,	1214.2,
0.08125,	1658.3,	1647.3,	1641.7,	1638.2,
0.09375,	2082.7,	2071.4,	2065.7,	2062.2,
0.10625,	2062.5,	2051.4,	2045.9,	2042.6,
0.11875,	1640.6,	1630.6,	1625.6,	1622.5,
0.13125,	1218.7,	1209.7,	1205.2,	1202.5,
0.14375,	796.81,	788.81,	784.83,	782.40,
0.15625,	801.38,	792.76,	788.47,	785.86,
0.16875,	1232.4,	1221.5,	1216.1,	1212.8,
0.18125,	1663.5,	1650.3,	1643.7,	1639.8,
0.19375,	2094.5,	2079.1,	2071.4,	2066.7,
0.20625,	2076.6,	2060.8,	2052.9,	2048.1,
0.21875,	1654.6,	1639.8,	1632.4,	1628.0,
0.23125,	1232.5,	1218.8,	1212.0,	1207.9,
0.24375,	810.48,	797.82,	791.55,	787.76,
0.25625,	815.24,	801.89,	795.27,	791.27,
0.26875,	1246.8,	1231.0,	1223.2,	1218.4,
0.28125,	1678.4,	1660.1,	1651.0,	1645.6,
0.29375,	2110,	2089.2,	2078.9,	2072.7,
0.30625,	2091.8,	2070.8,	2060.3,	2054.0,
0.31875,	1669.2,	1649.4,	1639.6,	1633.6,
Continua en la siguiente página				

Longitud [m]	T [°K]	T [°K]	T [°K]	T [°K]
0.33125,	1246.7,	1228.1,	1218.9,	1213.3,
0.34375,	824.1,	806.78,	798.19,	793.02,
0.35625,	829.07,	810.99,	802.01,	796.61,
0.36875,	1261.6,	1240.7,	1230.4,	1224.1,
0.38125,	1694.1,	1670.5,	1658.7,	1651.6,
0.39375,	2126.6,	2100.3,	2087.1,	2079.1,
0.40625,	2108.4,	2081.7,	2068.4,	2060.4,
0.41875,	1684.6,	1659.5,	1647.1,	1639.6,
0.43125,	1260.8,	1237.4,	1225.8,	1218.8,
0.44375,	836.96,	815.26,	804.51,	798.05,
0.45625,	841.28,	819.05,	808.03,	801.41,
0.46875,	1273.7,	1248.8,	1236.4,	1228.9,
0.48125,	1706.2,	1678.5,	1664.7,	1656.4,
0.49375,	2138.6,	2108.2,	2093.0,	2083.9,
0.50625,	2120.3,	2089.6,	2074.3,	2065.1,
0.51875,	1696.9,	1667.8,	1653.2,	1644.5,
0.53125,	1273.5,	1245.9,	1232.2,	1223.9,
0.54375,	850.17,	824.06,	811.08,	803.27,
0.55625,	854.62,	827.92,	814.65,	806.67,
0.56875,	1286.9,	1257.5,	1242.9,	1234.1,
0.58125,	1719.1,	1687.1,	1671.1,	1661.5,
0.59375,	2151.4,	2116.7,	2099.3,	2088.9,
0.60625,	2133.5,	2098.4,	2080.8,	2070.3,
0.61875,	1710.7,	1676.9,	1660.0,	1649.9,
0.63125,	1288,	1255.4,	1239.2,	1229.5,
0.64375,	865.23,	833.96,	818.43,	809.09,
0.65625,	869.71,	837.86,	822.03,	812.51,
0.66875,	1301.4,	1267.1,	1250.0,	1239.7,
0.68125,	1733.1,	1696.4,	1678.0,	1667.0,
0.69375,	2164.8,	2125.7,	2106.0,	2094.2,

Continua en la siguiente página

Longitud [m]	T [°K]	T [°K]	T [°K]	T [°K]
0.70625,	2146.6,	2107.1,	2087.4,	2075.5,
0.71875,	1723.7,	1685.6,	1666.5,	1655.1,
0.73125,	1300.8,	1264.1,	1245.7,	1234.6,
0.74375,	877.97,	842.55,	824.88,	814.23,
0.75625,	882.11,	846.20,	828.29,	817.51,
0.76875,	1313.2,	1275.0,	1255.9,	1244.5,
0.78125,	1744.4,	1703.8,	1683.6,	1671.4,
0.79375,	2175.5,	2132.7,	2111.3,	2098.4,
0.80625,	2157.3,	2114.2,	2092.6,	2079.7,
0.81875,	1735.1,	1693.1,	1672.1,	1659.5,
0.83125,	1312.8,	1272.0,	1251.6,	1239.3,
0.84375,	890.55,	850.87,	831.09,	819.18,
0.85625,	895.02,	854.75,	834.67,	822.59,
0.86875,	1326.2,	1283.6,	1262.4,	1249.6,
0.88125,	1757.4,	1712.5,	1690.1,	1676.6,
0.89375,	2188.6,	2141.4,	2117.7,	2103.5,
0.90625,	2170.3,	2122.7,	2099.0,	2084.7,
0.91875,	1747.6,	1701.4,	1678.3,	1664.4,
0.93125,	1324.9,	1280.0,	1257.6,	1244.1,
0.94375,	902.22,	858.58,	836.83,	823.75,
0.95625,	906.74,	862.50,	840.45,	827.18,
0.96875,	1338.4,	1291.7,	1268.4,	1254.4,
0.98125,	1770.2,	1720.9,	1696.3,	1681.6,
0.99375,	2201.9,	2150.1,	2124.3,	2108.7,
1.0063,	2183.7,	2131.6,	2105.6,	2090.0,
1.0188,	1760.9,	1710.2,	1684.9,	1669.6,
1.0313,	1338.2,	1288.8,	1264.1,	1249.3,
1.0438,	915.54,	867.38,	843.38,	828.94,
1.0563,	920.38,	871.51,	847.15,	832.50,
1.0688,	1352.8,	1301.2,	1275.5,	1260.0,

Continua en la siguiente página

Longitud [m]	T [°K]	T [°K]	T [°K]	T [°K]
1.0813,	1785.1,	1730.9,	1703.8,	1687.4,
1.0938,	2217.5,	2160.6,	2132.1,	2114.9,
1.1063,	2199.3,	2142.0,	2113.4,	2096.2,
1.1188,	1776,	1720.2,	1692.3,	1675.6,
1.1313,	1352.6,	1298.4,	1271.3,	1255.0,
1.1437,	929.32,	876.53,	850.25,	834.46,
1.1563,	933.3,	880.08,	853.60,	837.69,
1.1688,	1364.6,	1309.0,	1281.3,	1264.7,
1.1813,	1795.9,	1738.0,	1709.1,	1691.7,
1.1938,	2227.1,	2166.9,	2136.8,	2118.7,
1.2063,	2208.5,	2148.1,	2118.0,	2099.8,
1.2188,	1785.4,	1726.5,	1697.0,	1679.3,
1.2312,	1362.4,	1304.8,	1276.0,	1258.8,
1.2438,	939.27,	883.09,	855.09,	838.26,
1.2563,	943.35,	886.72,	858.50,	841.53,
1.2688,	1374.6,	1315.7,	1286.3,	1268.6,
1.2813,	1805.9,	1744.6,	1714.0,	1695.6,
1.2938,	2237.2,	2173.6,	2141.8,	2122.7,
1.3063,	2218.5,	2154.8,	2122.9,	2103.8,
1.3188,	1795.4,	1733.1,	1702.0,	1683.2,
1.3313,	1372.3,	1311.4,	1281.0,	1262.7,
1.3438,	949.15,	889.67,	860.02,	842.18,
1.3563,	953.3,	893.36,	863.46,	845.48,
1.3688,	1384.7,	1322.4,	1291.3,	1272.6,
1.3813,	1816.2,	1751.5,	1719.2,	1699.7,
1.3938,	2247.6,	2180.6,	2147.1,	2126.9,
1.4062,	2229,	2161.9,	2128.2,	2108.0,
1.4188,	1805.7,	1740.0,	1707.2,	1687.4,
1.4313,	1382.4,	1318.2,	1286.1,	1266.8,
1.4438,	959.11,	896.35,	865.03,	846.18,

Continúa en la siguiente página

Longitud [m]	T [°K]	T [°K]	T [°K]	T [°K]
1.4563,	962.96,	899.82,	868.30,	849.33,
1.4688,	1394,	1328.6,	1295.9,	1276.2,
1.4813,	1825,	1757.3,	1723.5,	1703.2,
1.4938,	2256,	2186.1,	2151.1,	2130.1,
1.5063,	2237.6,	2167.4,	2132.3,	2111.2,
1.5188,	1814.6,	1745.8,	1711.5,	1690.8,
1.5313,	1391.6,	1324.3,	1290.6,	1270.3,
1.5437,	968.67,	902.68,	869.73,	849.91,
1.5563,	973.31,	906.69,	873.41,	853.39,
1.5688,	1405.5,	1336.3,	1301.6,	1280.8,
1.5813,	1837.8,	1765.9,	1729.9,	1708.2,
1.5938,	2270,	2195.5,	2158.1,	2135.6,
1.6063,	2251.4,	2176.7,	2139.2,	2116.7,
1.6188,	1827.6,	1754.5,	1717.9,	1695.9,
1.6313,	1403.8,	1332.3,	1296.6,	1275.1,
1.6437,	980.02,	910.16,	875.29,	854.31,
1.6563,	983.61,	913.45,	878.43,	857.37,
1.6688,	1414.6,	1342.2,	1306.0,	1284.3,
1.6813,	1845.6,	1770.9,	1733.6,	1711.2,
1.6938,	2276.6,	2199.7,	2161.2,	2138.1,
1.7063,	2258,	2180.9,	2142.4,	2119.2,
1.7188,	1835,	1759.4,	1721.6,	1698.8,
1.7313,	1412,	1337.8,	1300.7,	1278.4,
1.7438,	989.01,	916.27,	879.90,	858.00,
1.7563,	992.43,	919.46,	882.98,	861.01,
1.7688,	1422.3,	1347.4,	1310.0,	1287.4,
1.7813,	1852.1,	1775.4,	1737.0,	1713.9,
1.7938,	2281.9,	2203.3,	2164.0,	2140.3,
1.8063,	2264.1,	2185.0,	2145.5,	2121.6,
1.8188,	1847.1,	1767.2,	1727.4,	1703.4,

Continua en la siguiente página

Longitud [m]	T [°K]	T [°K]	T [°K]	T [°K]
1.8313,	1430,	1349.4,	1309.3,	1285.2,
1.8438,	1012.9,	931.58,	891.25,	866.95,
1.8562,	706.81,	658.66,	634.65,	620.25,
1.8688,	666.63,	632.25,	615.00,	604.63,
1.8813,	656.92,	625.77,	610.14,	600.74,
1.8938,	648.58,	620.20,	605.95,	597.40,
1.9063,	645.56,	618.18,	604.43,	596.18,
1.9188,	642.55,	616.16,	602.91,	594.96,
1.9313,	639.76,	614.29,	601.50,	593.83,
1.9437,	637.24,	612.59,	600.23,	592.80,
1.9563,	634.72,	610.90,	598.95,	591.77,
1.9688,	632.2,	609.21,	597.68,	590.75,
1.9813,	629.68,	607.52,	596.40,	589.72,
1.9938)	627,16)	605,83)	595,13)	588,69)

Tabla D.3. Base de datos simulada, perfil de presiones para arreglo FCC, diferentes velocidades

	0.4 [m/s]	0.6 [m/s]	0.8 [m/s]	1 [m/s]
Longitud [m]	Presiones [Pa]			
L<- c(	Pa<- c(	Pb<- c(	Pc<- c(	Pd<- c(
0.00625,	15995147,	15989066,	15980549,	15969600,
0.018750,	15993361,	15985042,	15973391,	15958409,
0.031250,	15988357,	15973760,	15953319,	15927037,
0.04375,	15984338,	15964701,	15937202,	15901846,
0.05625,	15981100,	15957401,	15924216,	15881549,
0.06875,	15978497,	15951534,	15913778,	15865234,
0.08125,	15975895,	15945667,	15903340,	15848919,
0.09375,	15973292,	15939800,	15892903,	15832605,
0.10625,	15970690,	15933933,	15882465,	15816291,
0.11875,	15968087,	15928067,	15872028,	15799977,

Continúa en la siguiente página

Longitud [m]	Presión [Pa]	Presión [Pa]	Presión [Pa]	Presión [Pa]
0.13125,	15965485,	15922200,	15861590,	15783663,
0.14375,	15962037,	15914429,	15847766,	15762055,
0.15625,	15958383,	15906188,	15833101,	15739133,
0.16875,	15959210,	15908007,	15836322,	15744159,
0.18125,	15956082,	15900977,	15823824,	15724629,
0.19375,	15952390,	15892685,	15809083,	15701595,
0.20625,	15950283,	15887940,	15800644,	15688405,
0.21875,	15948022,	15882844,	15791577,	15674234,
0.23125,	15945762,	15877748,	15782511,	15660064,
0.24375,	15943501,	15872653,	15773445,	15645893,
0.25625,	15941240,	15867557,	15764379,	15631722,
0.26875,	15938979,	15862461,	15755313,	15617552,
0.28125,	15937508,	15859120,	15749357,	15608235,
0.29375,	15936489,	15856783,	15745179,	15601695,
0.30625,	15931787,	15846201,	15726363,	15572290,
0.31875,	15927714,	15837041,	15710075,	15546836,
0.33125,	15930803,	15844041,	15722547,	15566337,
0.34375,	15929179,	15840407,	15716092,	15556254,
0.35625,	15926294,	15833911,	15704538,	15538196,
0.36875,	15924494,	15829870,	15697354,	15526972,
0.38125,	15922695,	15825828,	15690171,	15515747,
0.39375,	15920895,	15821787,	15682987,	15504523,
0.40625,	15919096,	15817745,	15675804,	15493298,
0.41875,	15916980,	15812990,	15667351,	15480089,
0.43125,	15913294,	15804692,	15652592,	15457025,
0.44375,	15911295,	15800189,	15644583,	15444507,
0.45625,	15914397,	15807192,	15657049,	15463996,
0.46875,	15912559,	15803074,	15649734,	15452567,
0.48125,	15907920,	15792630,	15631153,	15423525,
0.49375,	15906172,	15788688,	15624141,	15412564,

Continúa en la siguiente página

Longitud [m]	Presión [Pa]	Presión [Pa]	Presión [Pa]	Presión [Pa]
0.50625,	15904352,	15784587,	15616846,	15401163,
0.51875,	15902518,	15780454,	15609494,	15389672,
0.53125,	15900683,	15776321,	15602142,	15378180,
0.54375,	15898426,	15771239,	15593102,	15364052,
0.55625,	15895961,	15765687,	15583228,	15348620,
0.56875,	15894747,	15762929,	15578311,	15340929,
0.58125,	15895541,	15764653,	15581349,	15345661,
0.59375,	15890139,	15752516,	15559778,	15311957,
0.60625,	15886612,	15744621,	15545757,	15290056,
0.61875,	15888238,	15748270,	15552240,	15300184,
0.63125,	15887727,	15747132,	15550221,	15297030,
0.64375,	15886345,	15744028,	15544702,	15288407,
0.65625,	15884964,	15740923,	15539183,	15279784,
0.66875,	15883583,	15737819,	15533665,	15271160,
0.68125,	15882201,	15734714,	15528146,	15262537,
0.69375,	15880820,	15731610,	15522628,	15253914,
0.70625,	15879431,	15728486,	15517076,	15245238,
0.71875,	15876139,	15721056,	15503851,	15224566,
0.73125,	15872802,	15713534,	15490474,	15203660,
0.74375,	15876257,	15721364,	15504421,	15225469,
0.75625,	15874355,	15717121,	15496891,	15213707,
0.76875,	15870188,	15707727,	15480183,	15187596,
0.78125,	15868366,	15703634,	15472910,	15176233,
0.79375,	15866570,	15699600,	15465741,	15165032,
0.80625,	15864773,	15695565,	15458572,	15153831,
0.81875,	15862977,	15691530,	15451402,	15142630,
0.83125,	15861180,	15687496,	15444233,	15131429,
0.84375,	15857476,	15679139,	15429371,	15108200,
0.85625,	15857956,	15680218,	15431293,	15111207,
0.86875,	15860725,	15686512,	15442503,	15128740,

Continúa en la siguiente página

Longitud [m]	Presión [Pa]	Presión [Pa]	Presión [Pa]	Presión [Pa]
0.88125,	15855082,	15673809,	15419914,	15093437,
0.89375,	15852394,	15667741,	15409117,	15076560,
0.90625,	15850676,	15663868,	15402229,	15065796,
0.91875,	15848959,	15659996,	15395342,	15055032,
0.93125,	15847241,	15656123,	15388454,	15044269,
0.94375,	15845523,	15652250,	15381567,	15033505,
0.95625,	15843806,	15648378,	15374679,	15022742,
0.96875,	15842138,	15644614,	15367985,	15012280,
0.98125,	15842144,	15644573,	15367894,	15012128,
0.99375,	15840218,	15640236,	15360180,	15000073,
1.0063,	15835784,	15630274,	15342476,	14972411,
1.0188,	15836719,	15632365,	15346195,	14978225,
1.0313,	15836167,	15631148,	15344041,	14974865,
1.0438,	15834853,	15628195,	15338795,	14966669,
1.0563,	15833539,	15625243,	15333549,	14958473,
1.0688,	15832225,	15622291,	15328302,	14950277,
1.0813,	15830911,	15619339,	15323056,	14942081,
1.0938,	15829597,	15616386,	15317810,	14933885,
1.1063,	15828113,	15613052,	15311884,	14924626,
1.1188,	15824258,	15604377,	15296460,	14900524,
1.1313,	15821689,	15598586,	15286159,	14884426,
1.1437,	15824637,	15605259,	15298044,	14903008,
1.1563,	15822365,	15600177,	15289021,	14888916,
1.1688,	15818734,	15591983,	15274444,	14866134,
1.1813,	15817053,	15588205,	15267730,	14855644,
1.1938,	15815372,	15584427,	15261016,	14845154,
1.2063,	15813692,	15580649,	15254302,	14834664,
1.2188,	15812011,	15576871,	15247588,	14824175,
1.2312,	15810053,	15572466,	15239759,	14811941,
1.2438,	15806433,	15564295,	15225223,	14789225,

Continúa en la siguiente página

Longitud [m]	Presión [Pa]	Presión [Pa]	Presión [Pa]	Presión [Pa]
1.2563,	15808505,	15568964,	15233537,	14802223,
1.2688,	15810578,	15573689,	15241962,	14815402,
1.2813,	15804696,	15560465,	15218443,	14778643,
1.2938,	15802368,	15555201,	15209074,	14763998,
1.3063,	15800571,	15551148,	15201863,	14752730,
1.3188,	15798785,	15547126,	15194712,	14741556,
1.3313,	15796998,	15543105,	15187562,	14730383,
1.3438,	15795212,	15539083,	15180411,	14719209,
1.3563,	15793426,	15535061,	15173260,	14708036,
1.3688,	15792076,	15531987,	15167784,	14699476,
1.3813,	15790884,	15529259,	15162919,	14691869,
1.3938,	15789552,	15526266,	15157628,	14683631,
1.4062,	15784821,	15515680,	15138814,	14654231,
1.4188,	15784305,	15514507,	15136718,	14650944,
1.4313,	15784008,	15513835,	15135518,	14649066,
1.4438,	15782699,	15510903,	15130313,	14640939,
1.4563,	15781384,	15507948,	15125063,	14632740,
1.4688,	15780081,	15505019,	15119861,	14624614,
1.4813,	15778778,	15502090,	15114658,	14616489,
1.4938,	15777475,	15499161,	15109455,	14608363,
1.5063,	15776172,	15496232,	15104252,	14600238,
1.5188,	15774868,	15493303,	15099050,	14592112,
1.5313,	15770498,	15483441,	15081500,	14564684,
1.5437,	15772037,	15486909,	15087680,	14574360,
1.5563,	15773238,	15489672,	15092632,	14582115,
1.5688,	15768884,	15479859,	15075176,	14554837,
1.5813,	15766304,	15474050,	15064850,	14538705,
1.5938,	15764546,	15470094,	15057821,	14527726,
1.6063,	15762787,	15466137,	15050791,	14516748,
1.6188,	15761028,	15462181,	15043762,	14505770,

Continúa en la siguiente página

Longitud [m]	Presión [Pa]	Presión [Pa]	Presión [Pa]	Presión [Pa]
1.6313,	15759269,	15458224,	15036732,	14494791,
1.6437,	15757243,	15453665,	15028630,	14482137,
1.6563,	15754182,	15446767,	15016368,	14462982,
1.6688,	15754761,	15448018,	15018576,	14466423,
1.6813,	15755394,	15449415,	15021059,	14470306,
1.6938,	15749488,	15436168,	14997518,	14433533,
1.7063,	15748064,	15432970,	14991810,	14424615,
1.7188,	15747992,	15432807,	14991525,	14424177,
1.7313,	15746663,	15429815,	14986237,	14415928,
1.7438,	15744926,	15425893,	14979266,	14405043,
1.7563,	15743188,	15421972,	14972296,	14394157,
1.7688,	15741450,	15418050,	14965325,	14383271,
1.7813,	15739713,	15414128,	14958354,	14372385,
1.7938,	15738544,	15411494,	14953661,	14365052,
1.8063,	15736015,	15405812,	14943577,	14349311,
1.8188,	15730945,	15394482,	14923532,	14318057,
1.8313,	15732670,	15398370,	14930453,	14328878,
1.8438,	15733457,	15400088,	14933435,	14333474,
1.8562,	15733668,	15400584,	14934324,	14334868,
1.8688,	15733879,	15401077,	14935210,	14336258,
1.8813,	15734089,	15401571,	14936097,	14337648,
1.8938,	15734299,	15402065,	14936983,	14339038,
1.9063,	15734509,	15402558,	14937869,	14340428,
1.9188,	15734719,	15403052,	14938755,	14341818,
1.9313,	15734929,	15403546,	14939641,	14343208,
1.9437,	15735139,	15404039,	14940527,	14344598,
1.9563,	15735350,	15404533,	14941414,	14345988,
1.9688,	15735560,	15405027,	14942300,	14347379,
1.9813,	15735836,	15405665,	14943440,	14349163,
1.9938)	15736142)	15406358)	14944675)	14351097)

Tabla D.4. Base de datos simulada, perfil de temperatura del fluido para arreglo BCC, diferentes velocidades

	0.4 [<i>m/s</i>]	0.6 [<i>m/s</i>]	0.8 [<i>m/s</i>]	1 [<i>m/s</i>]
Longitud [<i>m</i>]	Temperatura [$^{\circ}K$]			
L<- c(	Ta<- c(	Tb<- c(	Tc<- c(	Td<- c(
0.00625,	563.00,	563.00,	563.00,	563.00,
0.018750,	563.01,	563.00,	563.00,	563.00,
0.031250,	563.02,	563.01,	563.01,	563.00,
0.04375,	563.03,	563.02,	563.01,	563.01,
0.05625,	563.05,	563.03,	563.03,	563.02,
0.06875,	563.17,	563.11,	563.09,	563.07,
0.08125,	563.30,	563.20,	563.16,	563.13,
0.09375,	563.71,	563.48,	563.36,	563.29,
0.10625,	563.99,	563.67,	563.51,	563.41,
0.11875,	564.73,	564.17,	563.89,	563.72,
0.13125,	565.07,	564.40,	564.06,	563.86,
0.14375,	565.49,	564.69,	564.28,	564.04,
0.15625,	565.80,	564.90,	564.44,	564.17,
0.16875,	566.01,	565.04,	564.55,	564.25,
0.18125,	566.66,	565.48,	564.88,	564.52,
0.19375,	567.14,	565.80,	565.13,	564.71,
0.20625,	567.44,	566.00,	565.28,	564.84,
0.21875,	567.82,	566.26,	565.48,	565.00,
0.23125,	568.29,	566.58,	565.72,	565.19,
0.24375,	568.92,	567.00,	566.04,	565.45,
0.25625,	569.35,	567.29,	566.25,	565.62,
0.26875,	569.78,	567.58,	566.47,	565.80,
0.28125,	570.55,	568.10,	566.86,	566.11,
0.29375,	571.30,	568.60,	567.24,	566.41,
0.30625,	571.93,	569.02,	567.56,	566.67,
0.31875,	572.60,	569.48,	567.90,	566.94,
Continua en la siguiente página				

Longitud [m]	T [°K]	T [°K]	T [°K]	T [°K]
0.33125,	572.90,	569.67,	568.05,	567.06,
0.34375,	573.60,	570.14,	568.40,	567.35,
0.35625,	574.07,	570.46,	568.64,	567.54,
0.36875,	574.54,	570.78,	568.88,	567.73,
0.38125,	575.43,	571.37,	569.33,	568.09,
0.39375,	576.25,	571.92,	569.74,	568.42,
0.40625,	576.96,	572.40,	570.10,	568.70,
0.41875,	577.70,	572.89,	570.47,	569.00,
0.43125,	578.02,	573.11,	570.63,	569.14,
0.44375,	578.80,	573.63,	571.03,	569.45,
0.45625,	579.32,	573.98,	571.29,	569.66,
0.46875,	579.82,	574.31,	571.54,	569.86,
0.48125,	580.77,	574.95,	572.02,	570.24,
0.49375,	581.66,	575.55,	572.47,	570.60,
0.50625,	582.41,	576.05,	572.84,	570.90,
0.51875,	583.14,	576.54,	573.21,	571.20,
0.53125,	583.64,	576.87,	573.46,	571.40,
0.54375,	584.68,	577.57,	573.99,	571.82,
0.55625,	585.25,	577.95,	574.27,	572.05,
0.56875,	585.52,	578.13,	574.41,	572.16,
0.58125,	586.55,	578.82,	574.93,	572.57,
0.59375,	587.49,	579.45,	575.40,	572.95,
0.60625,	588.33,	580.01,	575.82,	573.29,
0.61875,	589.11,	580.53,	576.21,	573.60,
0.63125,	589.63,	580.87,	576.47,	573.81,
0.64375,	590.72,	581.60,	577.01,	574.24,
0.65625,	591.29,	581.98,	577.30,	574.47,
0.66875,	591.59,	582.18,	577.45,	574.59,
0.68125,	592.65,	582.89,	577.98,	575.02,
0.69375,	593.65,	583.56,	578.48,	575.42,

Continua en la siguiente página

Longitud [m]	T [°K]	T [°K]	T [°K]	T [°K]
0.70625,	594.56,	584.17,	578.94,	575.78,
0.71875,	595.43,	584.74,	579.37,	576.13,
0.73125,	595.81,	585.00,	579.57,	576.28,
0.74375,	596.67,	585.57,	579.99,	576.63,
0.75625,	597.33,	586.01,	580.32,	576.89,
0.76875,	598.23,	586.61,	580.77,	577.25,
0.78125,	599.48,	587.44,	581.40,	577.75,
0.79375,	600.36,	588.02,	581.83,	578.09,
0.80625,	601.15,	588.55,	582.23,	578.41,
0.81875,	602.00,	589.12,	582.66,	578.75,
0.83125,	602.54,	589.48,	582.93,	578.97,
0.84375,	603.55,	590.15,	583.43,	579.37,
0.85625,	604.27,	590.63,	583.79,	579.66,
0.86875,	604.87,	591.03,	584.09,	579.90,
0.88125,	605.96,	591.75,	584.63,	580.33,
0.89375,	606.68,	592.23,	584.99,	580.62,
0.90625,	607.35,	592.68,	585.33,	580.89,
0.91875,	608.47,	593.43,	585.89,	581.34,
0.93125,	609.27,	593.96,	586.28,	581.66,
0.94375,	610.04,	594.47,	586.67,	581.96,
0.95625,	610.73,	594.93,	587.01,	582.24,
0.96875,	611.47,	595.42,	587.38,	582.53,
0.98125,	612.76,	596.28,	588.02,	583.05,
0.99375,	613.42,	596.72,	588.35,	583.31,
1.0063,	614.07,	597.15,	588.67,	583.57,
1.0188,	615.17,	597.88,	589.22,	584.01,
1.0313,	615.94,	598.39,	589.61,	584.32,
1.0438,	616.69,	598.89,	589.98,	584.62,
1.0563,	617.37,	599.34,	590.31,	584.89,
1.0688,	618.09,	599.82,	590.67,	585.17,

Continua en la siguiente página

Longitud [m]	T [°K]	T [°K]	T [°K]	T [°K]
1.0813,	619.34,	600.66,	591.30,	585.67,
1.0938,	619.95,	601.06,	591.60,	585.91,
1.1063,	620.79,	601.62,	592.02,	586.25,
1.1188,	621.97,	602.40,	592.61,	586.72,
1.1313,	622.77,	602.94,	593.01,	587.04,
1.1437,	623.57,	603.47,	593.41,	587.36,
1.1563,	624.16,	603.86,	593.70,	587.59,
1.1688,	624.71,	604.23,	593.98,	587.81,
1.1813,	625.65,	604.85,	594.44,	588.18,
1.1938,	626.29,	605.28,	594.76,	588.44,
1.2063,	627.23,	605.91,	595.23,	588.81,
1.2188,	628.45,	606.72,	595.84,	589.30,
1.2312,	629.18,	607.21,	596.21,	589.59,
1.2438,	629.87,	607.67,	596.55,	589.87,
1.2563,	630.37,	608.00,	596.80,	590.07,
1.2688,	631.14,	608.51,	597.18,	590.37,
1.2813,	632.33,	609.31,	597.77,	590.84,
1.2938,	632.91,	609.69,	598.06,	591.07,
1.3063,	633.72,	610.23,	598.47,	591.40,
1.3188,	634.92,	611.03,	599.06,	591.87,
1.3313,	635.66,	611.52,	599.43,	592.17,
1.3438,	636.35,	611.98,	599.78,	592.45,
1.3563,	636.84,	612.31,	600.02,	592.64,
1.3688,	637.59,	612.80,	600.39,	592.94,
1.3813,	638.72,	613.56,	600.95,	593.38,
1.3938,	639.27,	613.92,	601.23,	593.60,
1.4062,	640.07,	614.46,	601.63,	593.92,
1.4188,	641.25,	615.24,	602.21,	594.39,
1.4313,	641.96,	615.72,	602.57,	594.68,
1.4438,	642.62,	616.16,	602.90,	594.94,

Continua en la siguiente página

Longitud [m]	T [°K]	T [°K]	T [°K]	T [°K]
1.4563,	643.08,	616.46,	603.13,	595.12,
1.4688,	643.43,	616.69,	603.30,	595.26,
1.4813,	644.17,	617.18,	603.67,	595.55,
1.4938,	645.02,	617.75,	604.09,	595.89,
1.5063,	646.01,	618.41,	604.59,	596.28,
1.5188,	647.22,	619.21,	605.19,	596.76,
1.5313,	647.87,	619.65,	605.52,	597.02,
1.5437,	648.49,	620.07,	605.83,	597.28,
1.5563,	649.02,	620.42,	606.09,	597.49,
1.5688,	649.82,	620.95,	606.49,	597.80,
1.5813,	650.78,	621.59,	606.97,	598.18,
1.5938,	651.29,	621.92,	607.22,	598.38,
1.6063,	651.91,	622.34,	607.53,	598.63,
1.6188,	652.81,	622.94,	607.98,	598.99,
1.6313,	653.65,	623.50,	608.40,	599.32,
1.6437,	654.47,	624.04,	608.81,	599.65,
1.6563,	654.80,	624.27,	608.97,	599.78,
1.6688,	655.22,	624.54,	609.18,	599.95,
1.6813,	655.81,	624.94,	609.48,	600.18,
1.6938,	656.64,	625.49,	609.89,	600.51,
1.7063,	657.71,	626.20,	610.42,	600.93,
1.7188,	658.87,	626.98,	611.00,	601.39,
1.7313,	659.49,	627.39,	611.31,	601.64,
1.7438,	660.09,	627.79,	611.61,	601.88,
1.7563,	660.40,	628.00,	611.76,	602.00,
1.7688,	660.80,	628.26,	611.96,	602.16,
1.7813,	661.38,	628.65,	612.25,	602.39,
1.7938,	662.15,	629.16,	612.63,	602.69,
1.8063,	662.95,	629.69,	613.03,	603.01,
1.8188,	663.94,	630.35,	613.52,	603.40,

Continua en la siguiente página

Longitud [m]	T [°K]	T [°K]	T [°K]	T [°K]
1.8313,	664.75,	630.89,	613.92,	603.71,
1.8438,	665.62,	631.47,	614.35,	604.05,
1.8562,	665.74,	631.55,	614.41,	604.09,
1.8688,	664.11,	630.46,	613.59,	603.43,
1.8813,	662.57,	629.43,	612.82,	602.80,
1.8938,	659.87,	627.63,	611.47,	601.72,
1.9063,	656.99,	625.71,	610.02,	600.56,
1.9188,	654.56,	624.09,	608.81,	599.58,
1.9313,	651.90,	622.31,	607.47,	598.51,
1.9437,	647.66,	619.48,	605.35,	596.81,
1.9563,	643.32,	616.59,	603.18,	595.08,
1.9688,	638.99,	613.69,	601.00,	593.34,
1.9813,	634.65,	610.79,	598.83,	591.61,
1.9938)	630,31)	607,90)	596,66)	589,87)

Tabla D.5. Base de datos simulada, perfil de temperatura de las esferas para arreglo BCC, diferentes velocidades

	0.4 [m/s]	0.6 [m/s]	0.8 [m/s]	1 [m/s]
Longitud [m]	Temperatura [°K]			
L<- c(	Ta<- c(	Tb<- c(	Tc<- c(	Td<- c(
0.00625,	563.004687,	563.003,	563.002,	563.001,
0.018750,	563.025613,	563.017,	563.013,	563.010,
0.031250,	563.141431,	563.096,	563.073,	563.060,
0.04375,	563.275294,	563.186,	563.143,	563.118,
0.05625,	791.678237,	786.431,	783.815,	782.297,
0.06875,	1216.30146,	1211.37,	1208.91,	1207.46,
0.08125,	1640.92468,	1636.31,	1634.00,	1632.63,
0.09375,	2065.5479,	2061.26,	2059.09,	2057.79,
0.10625,	2047.91716,	2043.12,	2040.70,	2039.22,
0.11875,	1631.49063,	1625.48,	1622.43,	1620.57,
Continua en la siguiente página				

Longitud [m]	T [°K]	T [°K]	T [°K]	T [°K]
0.13125,	1215.0641,	1207.84,	1204.16,	1201.92,
0.14375,	798.637573,	790.210,	785.899,	783.266,
0.15625,	802.274077,	793.548,	789.086,	786.361,
0.16875,	1225.97361,	1217.86,	1213.72,	1211.20,
0.18125,	1649.67315,	1642.17,	1638.36,	1636.04,
0.19375,	2073.37269,	2066.49,	2063.00,	2060.89,
0.20625,	2055.64105,	2048.28,	2044.55,	2042.29,
0.21875,	1639.90432,	1631.10,	1626.62,	1623.91,
0.23125,	1224.1676,	1213.91,	1208.69,	1205.53,
0.24375,	808.430868,	796.734,	790.764,	787.149,
0.25625,	811.967224,	800.005,	793.901,	790.206,
0.26875,	1234.77666,	1223.72,	1218.10,	1214.70,
0.28125,	1657.5861,	1647.45,	1642.31,	1639.19,
0.29375,	2080.39555,	2071.17,	2066.52,	2063.69,
0.30625,	2062.41715,	2052.81,	2047.97,	2045.02,
0.31875,	1646.93805,	1635.82,	1630.20,	1626.78,
0.33125,	1231.45895,	1218.83,	1212.44,	1208.55,
0.34375,	815.979847,	801.840,	794.674,	790.311,
0.35625,	819.470293,	805.081,	797.791,	793.353,
0.36875,	1241.93029,	1228.55,	1221.78,	1217.67,
0.38125,	1664.39028,	1652.02,	1645.78,	1641.99,
0.39375,	2086.85027,	2075.50,	2069.78,	2066.32,
0.40625,	2068.61788,	2056.96,	2051.08,	2047.53,
0.41875,	1652.71432,	1639.67,	1633.09,	1629.11,
0.43125,	1236.81076,	1222.38,	1215.10,	1210.70,
0.44375,	820.907196,	805.096,	797.120,	792.284,
0.45625,	824.366063,	808.314,	800.218,	795.309,
0.46875,	1247.18736,	1232.03,	1224.40,	1219.77,
0.48125,	1670.00866,	1655.76,	1648.58,	1644.24,
0.49375,	2092.82995,	2079.48,	2072.77,	2068.71,

Continua en la siguiente página

Longitud [m]	T [°K]	T [°K]	T [°K]	T [°K]
0.50625,	2074.83485,	2061.10,	2054.19,	2050.01,
0.51875,	1659.14718,	1643.95,	1636.30,	1631.67,
0.53125,	1243.45952,	1226.79,	1218.40,	1213.33,
0.54375,	827.771851,	809.647,	800.517,	794.992,
0.55625,	831.264181,	812.887,	803.631,	798.032,
0.56875,	1253.93651,	1236.51,	1227.74,	1222.45,
0.58125,	1676.60883,	1660.14,	1651.86,	1646.86,
0.59375,	2099.28116,	2083.77,	2075.98,	2071.28,
0.60625,	2081.20857,	2065.33,	2057.35,	2052.56,
0.61875,	1665.46622,	1648.13,	1639.41,	1634.20,
0.63125,	1249.72387,	1230.93,	1221.47,	1215.84,
0.64375,	833.981518,	813.737,	803.526,	797.481,
0.65625,	837.516489,	816.993,	806.655,	800.531,
0.66875,	1260.32878,	1240.70,	1230.85,	1224.99,
0.68125,	1683.14107,	1664.42,	1655.05,	1649.45,
0.69375,	2105.95337,	2088.13,	2079.26,	2073.91,
0.70625,	2088.09682,	2069.71,	2060.67,	2055.22,
0.71875,	1672.72952,	1652.49,	1642.78,	1636.89,
0.73125,	1257.36221,	1235.27,	1224.88,	1218.56,
0.74375,	841.994908,	818.056,	806.986,	800.233,
0.75625,	845.533305,	821.332,	810.128,	803.294,
0.76875,	1267.9774,	1245.10,	1234.31,	1227.74,
0.78125,	1690.4215,	1668.87,	1658.49,	1652.19,
0.79375,	2112.8656,	2092.64,	2082.67,	2076.64,
0.80625,	2094.66865,	2074.27,	2064.07,	2057.95,
0.81875,	1678.86501,	1657.11,	1646.14,	1639.63,
0.83125,	1263.06137,	1239.95,	1228.21,	1221.31,
0.84375,	847.257728,	822.796,	810.288,	803.003,
0.85625,	850.787895,	826.063,	813.415,	806.063,
0.86875,	1273.65187,	1249.75,	1237.59,	1230.49,

Continua en la siguiente página

Longitud [m]	T [°K]	T [°K]	T [°K]	T [°K]
0.88125,	1696.51584,	1673.44,	1661.78,	1654.93,
0.89375,	2119.37982,	2097.14,	2085.96,	2079.36,
0.90625,	2101.52192,	2078.73,	2067.33,	2060.71,
0.91875,	1686.05388,	1661.51,	1649.31,	1642.49,
0.93125,	1270.58584,	1244.30,	1231.29,	1224.27,
0.94375,	855.117804,	827.097,	813.274,	806.050,
0.95625,	858.669679,	830.373,	816.415,	809.110,
0.96875,	1281.24147,	1254.13,	1240.71,	1233.45,
0.98125,	1703.81325,	1677.89,	1665.02,	1657.79,
0.99375,	2126.38504,	2101.66,	2089.32,	2082.13,
1.0063,	2108.47292,	2083.41,	2070.88,	2063.45,
1.0188,	1693.32125,	1666.63,	1653.26,	1645.31,
1.0313,	1278.16958,	1249.85,	1235.65,	1227.17,
1.0438,	863.017913,	833.078,	818.038,	809.040,
1.0563,	866.515883,	836.330,	821.164,	812.078,
1.0688,	1288.66349,	1259.61,	1245.03,	1236.29,
1.0813,	1710.8111,	1682.89,	1668.89,	1660.50,
1.0938,	2132.95871,	2106.18,	2092.76,	2084.71,
1.1063,	2114.59416,	2087.53,	2073.98,	2065.85,
1.1188,	1698.70107,	1670.20,	1655.94,	1647.41,
1.1313,	1282.80799,	1252.86,	1237.90,	1228.96,
1.1437,	866.914905,	835.534,	819.872,	810.518,
1.1563,	870.453776,	838.807,	823.010,	813.575,
1.1688,	1293.4246,	1262.68,	1247.32,	1238.13,
1.1813,	1716.39543,	1686.56,	1671.63,	1662.69,
1.1938,	2139.36625,	2110.44,	2095.95,	2087.25,
1.2063,	2121.60264,	2092.23,	2077.48,	2068.65,
1.2188,	1706.2998,	1675.33,	1659.75,	1650.45,
1.2312,	1290.99696,	1258.44,	1242.02,	1232.24,
1.2438,	875.694112,	841.544,	824.288,	814.044,

Continua en la siguiente página

Longitud [m]	T [°K]	T [°K]	T [°K]	T [°K]
1.2563,	879.216335,	844.805,	827.418,	817.093,
1.2688,	1301.56362,	1268.22,	1251.40,	1241.39,
1.2813,	1723.91091,	1691.64,	1675.40,	1665.70,
1.2938,	2146.2582,	2115.06,	2099.39,	2090.00,
1.3063,	2128.20453,	2096.65,	2080.80,	2071.30,
1.3188,	1712.75261,	1679.67,	1663.04,	1653.06,
1.3313,	1297.30068,	1262.69,	1245.28,	1234.83,
1.3438,	881.848756,	845.719,	827.516,	816.600,
1.3563,	885.341368,	848.958,	830.630,	819.637,
1.3688,	1307.77852,	1272.41,	1254.62,	1243.94,
1.3813,	1730.21567,	1695.86,	1678.61,	1668.25,
1.3938,	2152.65282,	2119.32,	2102.60,	2092.55,
1.4062,	2134.63907,	2100.91,	2084.00,	2073.84,
1.4188,	1719.23509,	1683.92,	1666.22,	1655.59,
1.4313,	1303.83111,	1266.93,	1248.44,	1237.34,
1.4438,	888.427132,	849.952,	830.674,	819.099,
1.4563,	891.937928,	853.204,	833.797,	822.143,
1.4688,	1314.3635,	1276.69,	1257.81,	1246.48,
1.4813,	1736.78907,	1700.18,	1681.84,	1670.81,
1.4938,	2159.21464,	2123.67,	2105.86,	2095.15,
1.5063,	2141.12918,	2105.24,	2087.25,	2076.43,
1.5188,	1725.61323,	1688.21,	1669.45,	1658.17,
1.5313,	1310.09728,	1271.18,	1251.66,	1239.91,
1.5437,	894.581333,	854.155,	833.866,	821.650,
1.5563,	897.995767,	857.344,	836.942,	824.658,
1.5688,	1320.34058,	1280.75,	1260.89,	1248.93,
1.5813,	1742.6854,	1704.16,	1684.84,	1673.21,
1.5938,	2165.03022,	2127.56,	2108.78,	2097.49,
1.6063,	2146.56466,	2108.86,	2089.96,	2078.59,
1.6188,	1730.27932,	1691.29,	1671.75,	1659.99,

Continua en la siguiente página

Longitud [m]	T [°K]	T [°K]	T [°K]	T [°K]
1.6313,	1313.99398,	1273.72,	1253.54,	1241.38,
1.6437,	897.708642,	856.160,	835.335,	822.786,
1.6563,	901.110676,	859.339,	838.403,	825.786,
1.6688,	1324.20009,	1283.26,	1262.74,	1250.38,
1.6813,	1747.28949,	1707.19,	1687.09,	1674.99,
1.6938,	2170.3789,	2131.11,	2111.43,	2099.59,
1.7063,	2152.53552,	2112.84,	2092.94,	2080.96,
1.7188,	1737.0215,	1695.81,	1675.13,	1662.68,
1.7313,	1321.50748,	1278.77,	1257.32,	1244.41,
1.7438,	905.993464,	861.744,	839.521,	826.140,
1.7563,	909.044532,	864.689,	842.413,	829.000,
1.7688,	1330.66069,	1287.61,	1266.00,	1252.99,
1.7813,	1752.27684,	1710.53,	1689.59,	1676.98,
1.7938,	2173.893,	2133.46,	2113.18,	2100.97,
1.8063,	2152.96483,	2113.11,	2093.14,	2081.11,
1.8188,	1732.80145,	1692.98,	1673.02,	1660.99,
1.8313,	1312.63806,	1272.85,	1252.90,	1240.88,
1.8438,	892.474677,	852.723,	832.786,	820.771,
1.8562,	667.191435,	632.517,	615.129,	604.649,
1.8688,	663.663837,	630.164,	613.363,	603.229,
1.8813,	661.062035,	628.428,	612.058,	602.182,
1.8938,	656.883981,	625.638,	609.965,	600.506,
1.9063,	653.894441,	623.642,	608.467,	599.309,
1.9188,	650.927207,	621.661,	606.981,	598.122,
1.9313,	647.959974,	619.679,	605.494,	596.934,
1.9437,	644.99274,	617.698,	604.008,	595.746,
1.9563,	642.025506,	615.717,	602.521,	594.558,
1.9688,	639.058273,	613.735,	601.034,	593.370,
1.9813,	636.091039,	611.754,	599.548,	592.182,
1.9938)	633.105085)	609.760)	598.052)	590.987)

Tabla D.6. Base de datos simulada, perfil de presiones para arreglo BCC, diferentes velocidades

	0.4 [m/s]	0.6 [m/s]	0.8 [m/s]	1 [m/s]
Longitud [m]	Presiones [Pa]			
L<- c(	Pa<- c(	Pb<- c(	Pc<- c(	Pd<- c(
0.00625,	15999696,	15999326,	15998798,	15998119,
0.018750,	15999456,	15997523,	15995586,	15993093,
0.031250,	15998534,	15996149,	15993141,	15989268,
0.04375,	15997911,	15995007,	15991108,	15986087,
0.05625,	15997311,	15993959,	15989243,	15983168,
0.06875,	15996775,	15992911,	15987377,	15980249,
0.08125,	15996308,	15991862,	15985511,	15977330,
0.09375,	15995841,	15990814,	15983645,	15974411,
0.10625,	15995288,	15989766,	15981780,	15971492,
0.11875,	15994552,	15988717,	15979914,	15968573,
0.13125,	15993847,	15987487,	15977724,	15965146,
0.14375,	15993177,	15985868,	15974839,	15960632,
0.15625,	15993622,	15985222,	15973677,	15958802,
0.16875,	15993644,	15985176,	15973610,	15958707,
0.18125,	15992850,	15983683,	15970966,	15954580,
0.19375,	15992247,	15982812,	15969423,	15952170,
0.20625,	15991849,	15981954,	15967902,	15949794,
0.21875,	15991463,	15981096,	15966381,	15947419,
0.23125,	15991077,	15980238,	15964860,	15945044,
0.24375,	15990691,	15979379,	15963339,	15942668,
0.25625,	15990305,	15978521,	15961817,	15940293,
0.26875,	15990019,	15977663,	15960296,	15937918,
0.28125,	15989901,	15976832,	15958824,	15935618,
0.29375,	15989604,	15976455,	15958149,	15934560,
0.30625,	15988842,	15975029,	15955633,	15930643,
0.31875,	15988524,	15975174,	15955893,	15931049,
0.33125,	15988682,	15974681,	15955032,	15929713,
Continua en la siguiente página				

Longitud [m]	Presión [Pa]	Presión [Pa]	Presión [Pa]	Presión [Pa]
0.34375,	15988571,	15974122,	15954052,	15928192,
0.35625,	15988276,	15973627,	15953184,	15926843,
0.36875,	15988001,	15973132,	15952316,	15925495,
0.38125,	15987776,	15972638,	15951448,	15924146,
0.39375,	15987523,	15972143,	15950580,	15922797,
0.40625,	15987266,	15971648,	15949711,	15921449,
0.41875,	15986875,	15971087,	15948728,	15919922,
0.43125,	15986211,	15970122,	15947025,	15917269,
0.44375,	15986525,	15970081,	15946936,	15917114,
0.45625,	15986674,	15969725,	15946324,	15916178,
0.46875,	15986190,	15968688,	15944483,	15913304,
0.48125,	15985656,	15968091,	15943421,	15911645,
0.49375,	15985392,	15967494,	15942359,	15909987,
0.50625,	15985128,	15966897,	15941297,	15908328,
0.51875,	15984864,	15966300,	15940235,	15906669,
0.53125,	15984578,	15965704,	15939174,	15905010,
0.54375,	15984095,	15965107,	15938112,	15903352,
0.55625,	15983760,	15964344,	15936754,	15901230,
0.56875,	15984033,	15963582,	15935389,	15899090,
0.58125,	15984317,	15964524,	15937069,	15901723,
0.59375,	15983293,	15962441,	15933382,	15895976,
0.60625,	15982628,	15962365,	15933243,	15895750,
0.61875,	15982917,	15961846,	15932327,	15894324,
0.63125,	15982685,	15961328,	15931411,	15892898,
0.64375,	15982453,	15960810,	15930495,	15891472,
0.65625,	15982221,	15960291,	15929580,	15890045,
0.66875,	15981990,	15959773,	15928664,	15888619,
0.68125,	15981758,	15959255,	15927748,	15887193,
0.69375,	15981906,	15958736,	15926832,	15885767,
0.70625,	15981532,	15958725,	15926817,	15885745,

Continúa en la siguiente página

Longitud [m]	Presión [Pa]	Presión [Pa]	Presión [Pa]	Presión [Pa]
0.71875,	15980666,	15957411,	15924485,	15882114,
0.73125,	15980549,	15957201,	15924091,	15881476,
0.74375,	15980730,	15956802,	15923396,	15880406,
0.75625,	15980513,	15956105,	15922161,	15878482,
0.76875,	15980142,	15955534,	15921142,	15876889,
0.78125,	15979889,	15954963,	15920124,	15875297,
0.79375,	15979636,	15954391,	15919105,	15873704,
0.80625,	15979384,	15953820,	15918086,	15872111,
0.81875,	15978968,	15953249,	15917067,	15870518,
0.83125,	15978458,	15952643,	15915989,	15868832,
0.84375,	15978073,	15951497,	15913953,	15865660,
0.85625,	15978486,	15951573,	15914067,	15865805,
0.86875,	15978656,	15951406,	15913774,	15865359,
0.88125,	15978078,	15950295,	15911805,	15862290,
0.89375,	15977563,	15949829,	15910975,	15860990,
0.90625,	15977320,	15949363,	15910145,	15859691,
0.91875,	15977114,	15948897,	15909315,	15858391,
0.93125,	15976908,	15948431,	15908485,	15857092,
0.94375,	15976702,	15947965,	15907655,	15855793,
0.95625,	15976496,	15947499,	15906824,	15854493,
0.96875,	15976457,	15947033,	15905994,	15853194,
0.98125,	15976869,	15946909,	15905748,	15852779,
0.99375,	15975916,	15945875,	15903905,	15849911,
1.0063,	15975294,	15945620,	15903482,	15849264,
1.0188,	15975435,	15945337,	15902985,	15848491,
1.0313,	15975321,	15944820,	15902067,	15847058,
1.0438,	15975162,	15944302,	15901150,	15845626,
1.0563,	15974931,	15943785,	15900232,	15844193,
1.0688,	15974700,	15943268,	15899314,	15842760,
1.0813,	15974613,	15942750,	15898396,	15841328,

Continúa en la siguiente página

Longitud [m]	Presión [Pa]	Presión [Pa]	Presión [Pa]	Presión [Pa]
1.0938,	15974600,	15942269,	15897544,	15839998,
1.1063,	15973988,	15942241,	15897508,	15839947,
1.1188,	15973209,	15940512,	15894399,	15835078,
1.1313,	15973284,	15940724,	15894760,	15835622,
1.1437,	15973522,	15940295,	15894018,	15834483,
1.1563,	15973259,	15939533,	15892655,	15832353,
1.1688,	15972796,	15939018,	15891731,	15830905,
1.1813,	15972571,	15938502,	15890807,	15829457,
1.1938,	15972347,	15937986,	15889883,	15828009,
1.2063,	15972122,	15937471,	15888959,	15826562,
1.2188,	15971719,	15936955,	15888035,	15825114,
1.2312,	15971179,	15936376,	15886997,	15823491,
1.2438,	15970927,	15935109,	15884744,	15819974,
1.2563,	15971581,	15935896,	15886111,	15822079,
1.2688,	15971530,	15935111,	15884730,	15819937,
1.2813,	15970782,	15934252,	15883206,	15817559,
1.2938,	15970428,	15933789,	15882380,	15816265,
1.3063,	15970242,	15933265,	15881448,	15814807,
1.3188,	15970028,	15932742,	15880515,	15813349,
1.3313,	15969797,	15932219,	15879583,	15811892,
1.3438,	15969566,	15931696,	15878651,	15810434,
1.3563,	15969336,	15931173,	15877718,	15808976,
1.3688,	15969254,	15930650,	15876786,	15807518,
1.3813,	15969441,	15930402,	15876349,	15806835,
1.3938,	15968771,	15929753,	15875169,	15804980,
1.4062,	15968143,	15928909,	15873668,	15802628,
1.4188,	15968207,	15928821,	15873521,	15802403,
1.4313,	15968101,	15928391,	15872757,	15801210,
1.4438,	15967958,	15927940,	15871955,	15799954,
1.4563,	15967756,	15927489,	15871152,	15798698,

Continúa en la siguiente página

Longitud [m]	Presión [Pa]	Presión [Pa]	Presión [Pa]	Presión [Pa]
1.4688,	15967555,	15927037,	15870349,	15797442,
1.4813,	15967354,	15926586,	15869546,	15796186,
1.4938,	15967152,	15926134,	15868743,	15794930,
1.5063,	15966889,	15925683,	15867940,	15793674,
1.5188,	15966392,	15925140,	15866975,	15792166,
1.5313,	15965639,	15923736,	15864470,	15788248,
1.5437,	15966323,	15924491,	15865807,	15790326,
1.5563,	15966448,	15923709,	15864426,	15788178,
1.5688,	15965870,	15922896,	15862971,	15785900,
1.5813,	15965403,	15922313,	15861927,	15784265,
1.5938,	15965147,	15921730,	15860884,	15782629,
1.6063,	15964891,	15921147,	15859840,	15780994,
1.6188,	15964634,	15920565,	15858796,	15779359,
1.6313,	15964318,	15919982,	15857752,	15777723,
1.6437,	15963820,	15919399,	15856708,	15776088,
1.6563,	15963644,	15918473,	15855050,	15773491,
1.6688,	15963991,	15918283,	15854684,	15772899,
1.6813,	15963846,	15918100,	15854362,	15772395,
1.6938,	15962883,	15916504,	15851526,	15767970,
1.7063,	15962514,	15916406,	15851355,	15767694,
1.7188,	15962536,	15915754,	15850192,	15765871,
1.7313,	15962247,	15915102,	15849030,	15764048,
1.7438,	15961957,	15914450,	15847868,	15762226,
1.7563,	15961668,	15913798,	15846705,	15760403,
1.7688,	15961378,	15913146,	15845543,	15758580,
1.7813,	15961089,	15912495,	15844380,	15756757,
1.7938,	15961208,	15911843,	15843218,	15754934,
1.8063,	15960316,	15911397,	15842421,	15753686,
1.8188,	15959671,	15909739,	15839460,	15749057,
1.8313,	15960206,	15910651,	15841099,	15751627,

Continúa en la siguiente página

Longitud [m]	Presión [Pa]	Presión [Pa]	Presión [Pa]	Presión [Pa]
1.8438,	15960267,	15910789,	15841353,	15752036,
1.8562,	15960328,	15910928,	15841608,	15752445,
1.8688,	15960389,	15911066,	15841862,	15752854,
1.8813,	15960450,	15911204,	15842117,	15753263,
1.8938,	15960511,	15911343,	15842371,	15753672,
1.9063,	15960572,	15911481,	15842625,	15754082,
1.9188,	15960633,	15911620,	15842880,	15754491,
1.9313,	15960693,	15911758,	15843134,	15754900,
1.9437,	15960754,	15911896,	15843389,	15755309,
1.9563,	15960845,	15912035,	15843643,	15755718,
1.9688,	15960989,	15912173,	15843897,	15756127,
1.9813,	15961077,	15912383,	15844280,	15756736,
1.9938)	15961114	15912591	15844656	15757332

Anexo E

Gráficos de estado físico y condiciones técnicas de simulación BCC

Las Tablas y Figuras de estado físico evidencian el trabajo de las corridas de simulación para distintas velocidades.

Tabla E.1. Características técnicas de la simulación, BCC 0.4 [m/s]

Ítem	Propiedades
Modelo	BCC 0.4.mph COMSOL 5.0.0.243
Nodos	1200
Tiempo de estudio	30 h, 13 min, 13 s
Cantidad de esferas	378

(Fuente: Propia)

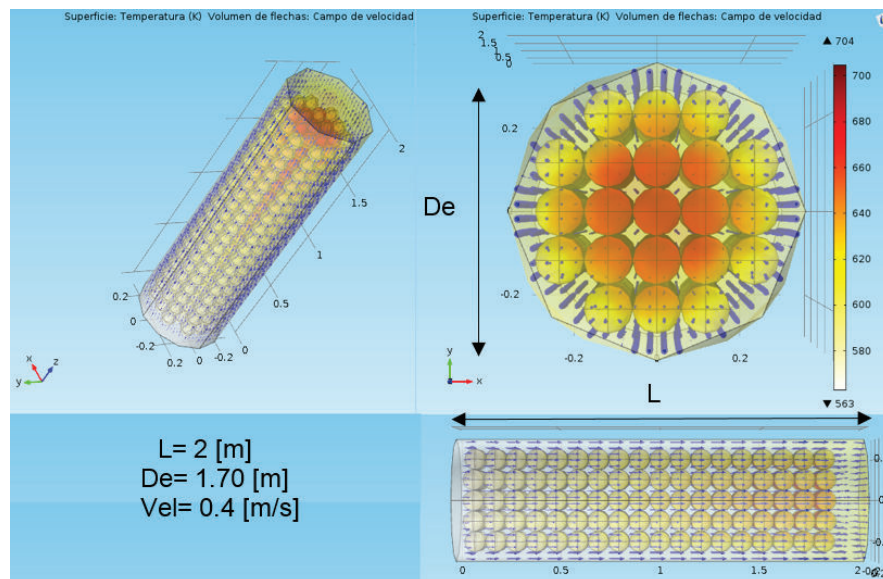


Figura E.1. Temperatura, arreglo BCC, velocidad 0.4 [m/s]
(Fuente: Propia)

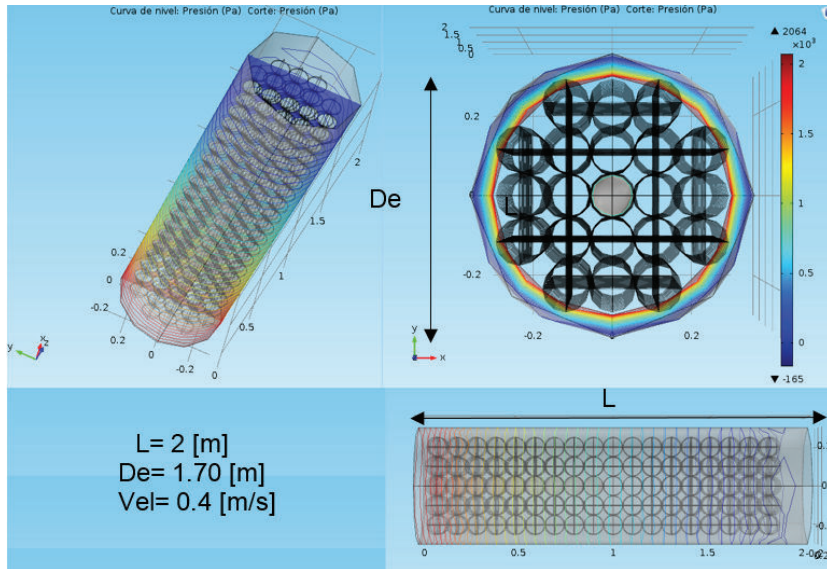


Figura E.2. Presión, arreglo BCC, velocidad 0.4 [m/s]
(Fuente: Propia)

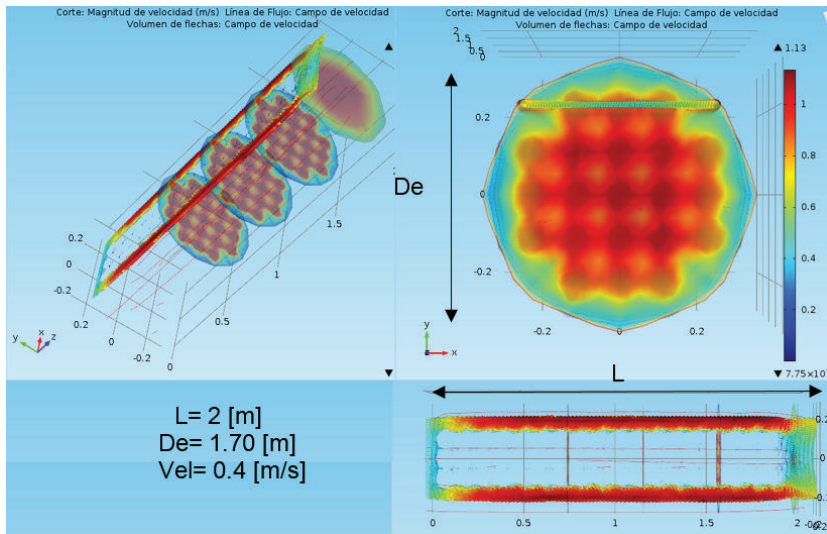


Figura E.3. Arreglo BCC, velocidad 0.4 [m/s]
(Fuente: Propia)

Tabla E.2. Características técnicas de la simulación, BCC 0.6 [m/s]

Ítem	Propiedades
Modelo	BCC 0.6.mph COMSOL 5.0.0.243
Nodos	1200
Tiempo de estudio	30 h, 45 min, 10 s
Cantidad de esferas	378

(Fuente: Propia)



Figura E.4. Temperatura, arreglo BCC, velocidad 0.6 [m/s]
(Fuente: Propia)

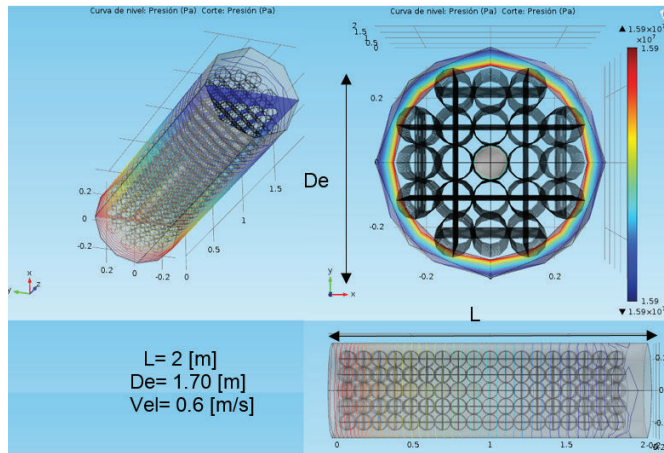


Figura E.5. Presión, arreglo BCC, velocidad 0.6 [m/s]
(Fuente: Propia)

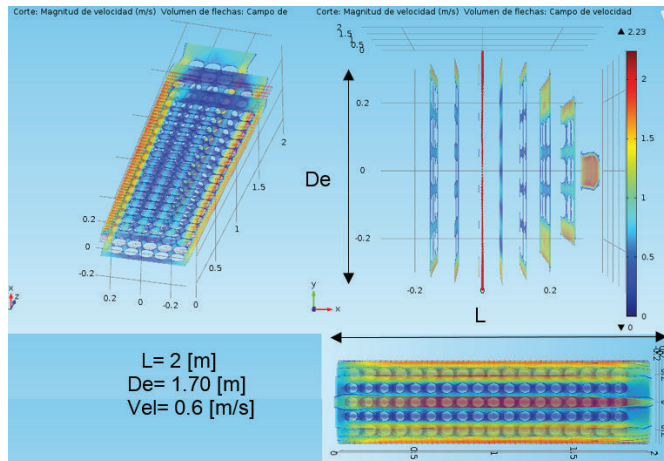


Figura E.6. Arreglo BCC, velocidad 0.6 [m/s]
(Fuente: Propia)

Tabla E.3. Características técnicas de la simulación, BCC 0.8 [m/s]

Ítem	Propiedades
Modelo	BCC 0.8.mph COMSOL 5.0.0.243
Nodos	1200
Tiempo de estudio	34 h, 12 min, 5 s
Cantidad de esferas	378

(Fuente: Propia)

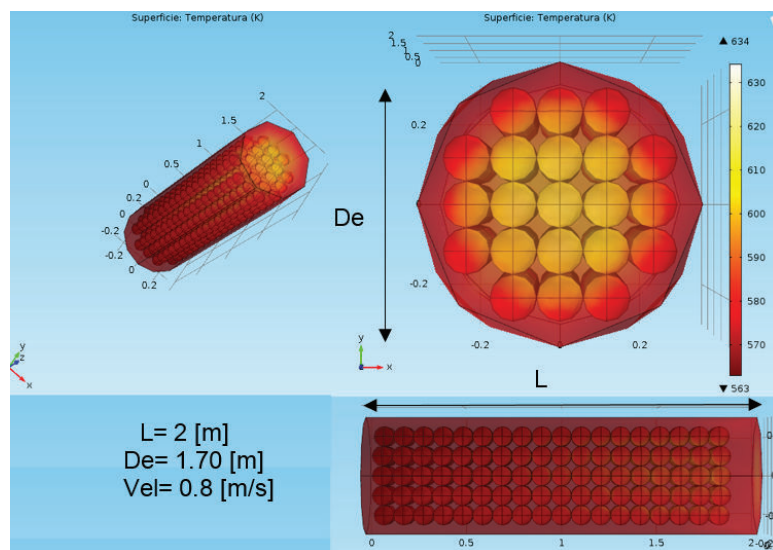


Figura E.7. Temperatura, arreglo BCC, velocidad 0.8 [m/s]
(Fuente: Propia)

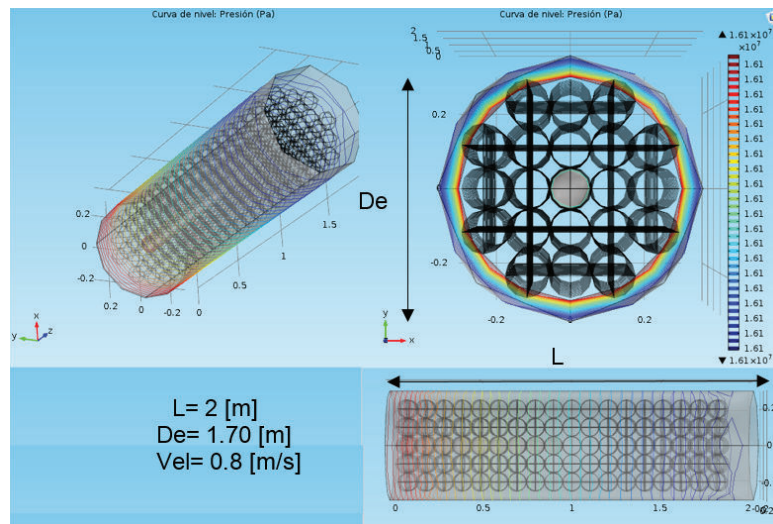


Figura E.8. Presión, arreglo BCC, velocidad 0.8 [m/s]
(Fuente: Propia)

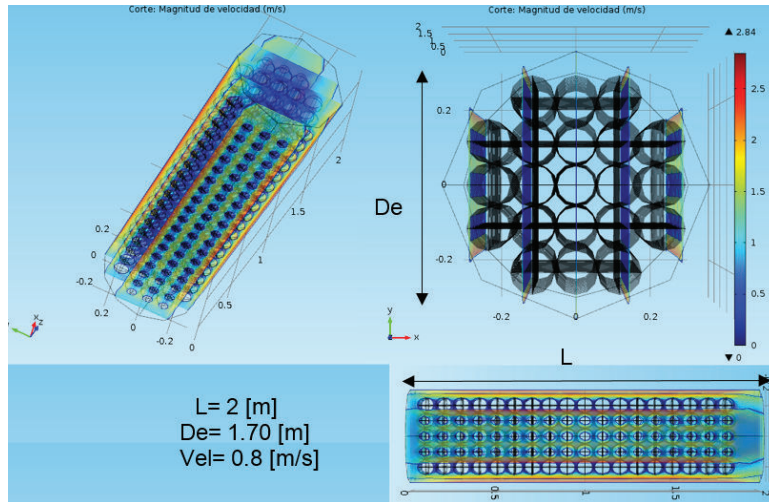


Figura E.9. Arreglo BCC, velocidad 0.8 [m/s]
(Fuente: Propia)

Tabla E.4. Características técnicas de la simulación, BCC 1 [m/s]

Ítem	Propiedades
Modelo	BCC 1.mph COMSOL 5.0.0.243
Nodos	1200
Tiempo de estudio	30 h, 10 min, 15 s
Cantidad de esferas	378

(Fuente: Propia)

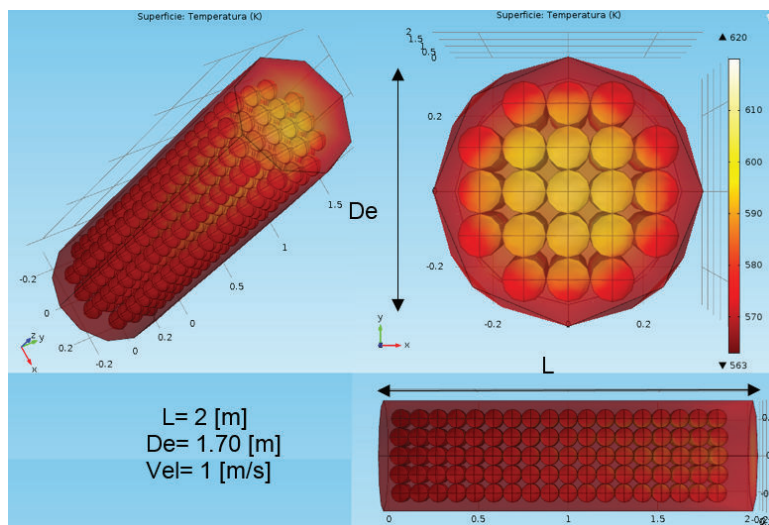


Figura E.10. Temperatura, arreglo BCC, velocidad 1 [m/s]
(Fuente: Propia)

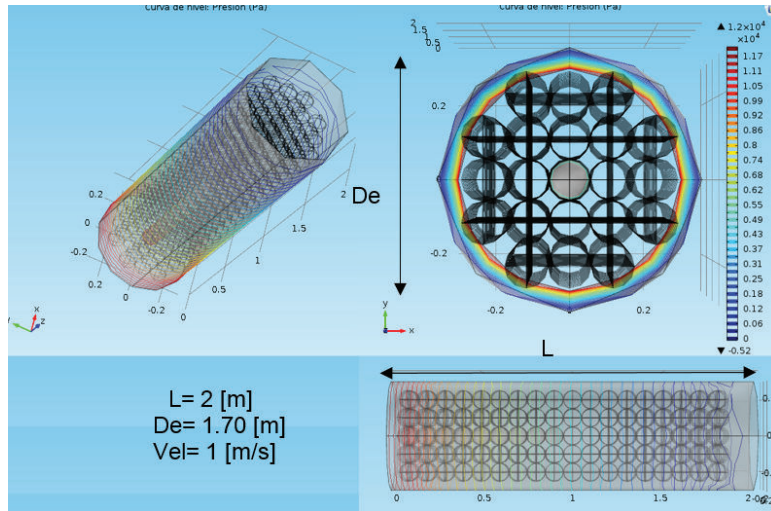


Figura E.11. Presión, arreglo BCC, velocidad 1 [m/s]
 (Fuente: Propia)

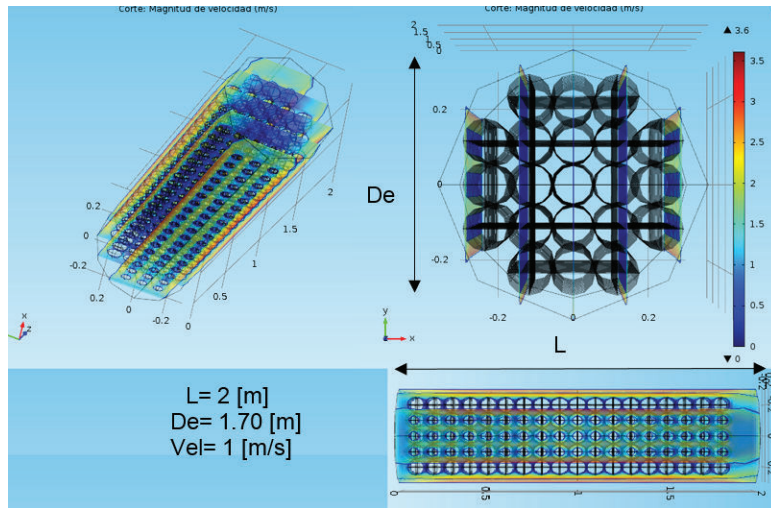


Figura E.12. Arreglo BCC, velocidad 1 [m/s]
 (Fuente: Propia)

Anexo F

Datos calculados, temperatura del fluido para FCC y BCC diferentes velocidades

Las siguientes tablas muestra la temperatura del fluido a diferentes velocidades el separador decimal para esta sección será ",".

1. $V1=0.4 \text{ m/s}$.
2. $V2=0.6 \text{ m/s}$.
3. $V3=0.8 \text{ m/s}$.
4. $V4=1 \text{ m/s}$.

Tabla F.1. Base de datos modelo matemático del perfil de temperatura del fluido

	V1	V2	V3	V4	V1	V2	V3	V4
L [m]	Arreglo BCC [$^{\circ}K$]				Arreglo BCC [$^{\circ}K$]			
0,00	563	563	563	563	563	563	563,2	563
0,01	563	563	563	563	563	563	563,6	563
0,03	563	563	563	563	563	563	564,1	563
0,04	563	563	563	563	563	563	564,6	563
0,05	563,2	563,1	563,1	563,1	563,4	563,3	565,0	563,1
0,06	563,8	563,5	563,4	563,3	564,3	563,9	565,5	563,5
0,08	564,4	563,9	563,7	563,5	565,3	564,5	566,0	563,9
0,09	565,0	564,3	564,0	563,8	566,2	565,1	566,4	564,3
0,10	565,6	564,7	564,3	564,0	567,1	565,8	566,9	564,6
0,11	566,2	565,1	564,6	564,3	568,1	566,4	567,4	565,0
0,13	566,8	565,5	564,9	564,5	569,0	567,0	567,8	565,4
0,14	567,4	565,9	565,2	564,7	569,9	567,6	568,3	565,8
0,15	568,0	566,3	565,5	565,0	570,9	568,2	568,8	566,1
0,16	568,6	566,7	565,8	565,2	571,8	568,9	569,2	566,5
0,18	569,2	567,1	566,1	565,4	572,7	569,5	569,7	566,9
Continúa en la siguiente página								

L [m]	Arreglo BCC [°K]				Arreglo FCC [°K]			
0,19	569,8	567,5	566,4	565,7	573,7	570,1	570,2	567,2
0,20	570,4	567,9	566,7	565,9	574,6	570,7	570,6	567,6
0,21	571,0	568,3	567,0	566,2	575,5	571,4	571,1	568,0
0,23	571,5	568,7	567,2	566,4	576,5	572,0	571,6	568,4
0,24	572,1	569,1	567,5	566,6	577,4	572,6	572,0	568,7
0,25	572,7	569,5	567,8	566,9	578,3	573,2	572,5	569,1
0,26	573,3	569,9	568,1	567,1	579,3	573,8	573,0	569,5
0,28	573,9	570,3	568,4	567,3	580,2	574,5	573,4	569,9
0,29	574,5	570,7	568,7	567,6	581,1	575,1	573,9	570,2
0,30	575,1	571,1	569,0	567,8	582,1	575,7	574,4	570,6
0,31	575,7	571,5	569,3	568,1	583,0	576,3	574,8	571,0
0,33	576,3	571,9	569,6	568,3	583,9	577,0	575,3	571,4
0,34	576,9	572,3	569,9	568,5	584,9	577,6	575,8	571,7
0,35	577,5	572,6	570,2	568,8	585,8	578,2	576,2	572,1
0,36	578,1	573,0	570,5	569,0	586,7	578,8	576,7	572,5
0,38	578,7	573,4	570,8	569,2	587,7	579,4	577,2	572,9
0,39	579,3	573,8	571,1	569,5	588,6	580,1	577,6	573,2
0,40	579,9	574,2	571,4	569,7	589,5	580,7	578,1	573,6
0,41	580,4	574,6	571,7	570,0	590,5	581,3	578,6	574,0
0,43	581,0	575,0	572,0	570,2	591,4	581,9	579,0	574,3
0,44	581,6	575,4	572,3	570,4	592,3	582,6	579,5	574,7
0,45	582,2	575,8	572,6	570,7	593,3	583,2	580,0	575,1
0,46	582,8	576,2	572,9	570,9	594,2	583,8	580,4	575,5
0,48	583,4	576,6	573,2	571,1	595,1	584,4	580,9	575,8
0,49	584,0	577,0	573,5	571,4	596,1	585,0	581,4	576,2
0,50	584,6	577,4	573,8	571,6	597,0	585,7	581,8	576,6
0,51	585,2	577,8	574,1	571,9	597,9	586,3	582,3	577,0
0,53	585,8	578,2	574,4	572,1	598,9	586,9	582,8	577,3
0,54	586,4	578,6	574,7	572,3	599,8	587,5	583,2	577,7
0,55	587,0	579,0	575,0	572,6	600,7	588,2	583,7	578,1

Continúa en la siguiente página

L [m]	Arreglo BCC [°K]				Arreglo FCC [°K]			
0,56	587,6	579,4	575,3	572,8	601,7	588,8	584,2	578,5
0,58	588,2	579,8	575,6	573,0	602,6	589,4	584,6	578,8
0,59	588,7	580,2	575,8	573,3	603,5	590,0	585,1	579,2
0,60	589,3	580,6	576,1	573,5	604,5	590,6	585,6	579,6
0,61	589,9	581,0	576,4	573,8	605,4	591,3	586,0	579,9
0,63	590,5	581,4	576,7	574,0	606,3	591,9	586,5	580,3
0,64	591,1	581,8	577,0	574,2	607,3	592,5	587,0	580,7
0,65	591,7	582,1	577,3	574,5	608,2	593,1	587,4	581,1
0,66	592,3	582,5	577,6	574,7	609,1	593,8	587,9	581,4
0,68	592,9	582,9	577,9	574,9	610,1	594,4	588,4	581,8
0,69	593,5	583,3	578,2	575,2	611,0	595,0	588,8	582,2
0,70	594,1	583,7	578,5	575,4	611,9	595,6	589,3	582,6
0,71	594,7	584,1	578,8	575,7	612,9	596,2	589,8	582,9
0,73	595,3	584,5	579,1	575,9	613,8	596,9	590,2	583,3
0,74	595,9	584,9	579,4	576,1	614,7	597,5	590,7	583,7
0,75	596,5	585,3	579,7	576,4	615,7	598,1	591,2	584,1
0,76	597,0	585,7	580,0	576,6	616,6	598,7	591,6	584,4
0,78	597,6	586,1	580,3	576,8	617,5	599,4	592,1	584,8
0,79	598,2	586,5	580,6	577,1	618,5	600,0	592,6	585,2
0,80	598,8	586,9	580,9	577,3	619,4	600,6	593,0	585,6
0,81	599,4	587,3	581,2	577,6	620,3	601,2	593,5	585,9
0,83	600,0	587,7	581,5	577,8	621,3	601,8	594,0	586,3
0,84	600,6	588,1	581,8	578,0	622,2	602,5	594,4	586,7
0,85	601,2	588,5	582,1	578,3	623,1	603,1	594,9	587,0
0,86	601,8	588,9	582,4	578,5	624,1	603,7	595,4	587,4
0,88	602,4	589,3	582,7	578,7	625,0	604,3	595,8	587,8
0,89	603,0	589,7	583,0	579,0	625,9	605,0	596,3	588,2
0,90	603,6	590,1	583,3	579,2	626,9	605,6	596,8	588,5
0,91	604,2	590,5	583,6	579,5	627,8	606,2	597,2	588,9
0,93	604,8	590,9	583,9	579,7	628,7	606,8	597,7	589,3

Continúa en la siguiente página

L [m]	Arreglo BCC [°K]				Arreglo FCC [°K]			
0,94	605,3	591,3	584,1	579,9	629,7	607,4	598,2	589,7
0,95	605,9	591,6	584,4	580,2	630,6	608,1	598,6	590,0
0,96	606,5	592,0	584,7	580,4	631,5	608,7	599,1	590,4
0,98	607,1	592,4	585,0	580,6	632,5	609,3	599,6	590,8
0,99	607,7	592,8	585,3	580,9	633,4	609,9	600,0	591,2
1,00	608,3	593,2	585,6	581,1	634,3	610,6	600,5	591,5
1,01	608,9	593,6	585,9	581,4	635,3	611,2	601,0	591,9
1,03	609,5	594,0	586,2	581,6	636,2	611,8	601,4	592,3
1,04	610,1	594,4	586,5	581,8	637,1	612,4	601,9	592,7
1,05	610,7	594,8	586,8	582,1	638,1	613,1	602,4	593,0
1,06	611,3	595,2	587,1	582,3	639,0	613,7	602,8	593,4
1,08	611,9	595,6	587,4	582,5	639,9	614,3	603,3	593,8
1,09	612,5	596,0	587,7	582,8	640,9	614,9	603,8	594,1
1,10	613,1	596,4	588,0	583,0	641,8	615,5	604,2	594,5
1,11	613,7	596,8	588,3	583,3	642,7	616,2	604,7	594,9
1,13	614,2	597,2	588,6	583,5	643,7	616,8	605,2	595,3
1,14	614,8	597,6	588,9	583,7	644,6	617,4	605,6	595,6
1,15	615,4	598,0	589,2	584,0	645,5	618,0	606,1	596,0
1,16	616,0	598,4	589,5	584,2	646,5	618,7	606,6	596,4
1,18	616,6	598,8	589,8	584,4	647,4	619,3	607,0	596,8
1,19	617,2	599,2	590,1	584,7	648,3	619,9	607,5	597,1
1,20	617,8	599,6	590,4	584,9	649,3	620,5	608,0	597,5
1,21	618,4	600,0	590,7	585,2	650,2	621,1	608,4	597,9
1,23	619,0	600,4	591,0	585,4	651,1	621,8	608,9	598,3
1,24	619,6	600,8	591,3	585,6	652,1	622,4	609,4	598,6
1,25	620,2	601,1	591,6	585,9	653,0	623,0	609,8	599,0
1,26	620,8	601,5	591,9	586,1	653,9	623,6	610,3	599,4
1,28	621,4	601,9	592,2	586,3	654,9	624,3	610,8	599,8
1,29	622,0	602,3	592,5	586,6	655,8	624,9	611,2	600,1
1,30	622,5	602,7	592,7	586,8	656,7	625,5	611,7	600,5

Continúa en la siguiente página

L [m]	Arreglo BCC [°K]				Arreglo FCC [°K]			
1,31	623,1	603,1	593,0	587,1	657,7	626,1	612,2	600,9
1,33	623,7	603,5	593,3	587,3	658,6	626,7	612,6	601,2
1,34	624,3	603,9	593,6	587,5	659,5	627,4	613,1	601,6
1,35	624,9	604,3	593,9	587,8	660,5	628,0	613,6	602,0
1,36	625,5	604,7	594,2	588,0	661,4	628,6	614,0	602,4
1,38	626,1	605,1	594,5	588,2	662,3	629,2	614,5	602,7
1,39	626,7	605,5	594,8	588,5	663,3	629,9	615,0	603,1
1,40	627,3	605,9	595,1	588,7	664,2	630,5	615,4	603,5
1,41	627,9	606,3	595,4	589,0	665,1	631,1	615,9	603,9
1,43	628,5	606,7	595,7	589,2	666,1	631,7	616,4	604,2
1,44	629,1	607,1	596,0	589,4	667,0	632,3	616,8	604,6
1,45	629,7	607,5	596,3	589,7	667,9	633,0	617,3	605,0
1,46	630,3	607,9	596,6	589,9	668,9	633,6	617,8	605,4
1,48	630,9	608,3	596,9	590,1	669,8	634,2	618,2	605,7
1,49	631,4	608,7	597,2	590,4	670,7	634,8	618,7	606,1
1,50	632,0	609,1	597,5	590,6	671,7	635,5	619,2	606,5
1,51	632,6	609,5	597,8	590,9	672,6	636,1	619,6	606,9
1,53	633,2	609,9	598,1	591,1	673,5	636,7	620,1	607,2
1,54	633,8	610,3	598,4	591,3	674,5	637,3	620,6	607,6
1,55	634,4	610,7	598,7	591,6	675,4	637,9	621,0	608,0
1,56	635,0	611,0	599,0	591,8	676,3	638,6	621,5	608,3
1,58	635,6	611,4	599,3	592,0	677,3	639,2	622,0	608,7
1,59	636,2	611,8	599,6	592,3	678,2	639,8	622,4	609,1
1,60	636,8	612,2	599,9	592,5	679,1	640,4	622,9	609,5
1,61	637,4	612,6	600,2	592,8	680,1	641,1	623,4	609,8
1,63	638,0	613,0	600,5	593,0	681,0	641,7	623,8	610,2
1,64	638,6	613,4	600,8	593,2	681,9	642,3	624,3	610,6
1,65	639,2	613,8	601,1	593,5	682,9	642,9	624,8	611,0
1,66	639,7	614,2	601,3	593,7	683,8	643,6	625,2	611,3
1,68	640,3	614,6	601,6	593,9	684,7	644,2	625,7	611,7

Continúa en la siguiente página

L [m]	Arreglo BCC [°K]				Arreglo FCC [°K]			
1,69	640,9	615,0	601,9	594,2	685,7	644,8	626,2	612,1
1,70	641,5	615,4	602,2	594,4	686,6	645,4	626,6	612,5
1,71	642,1	615,8	602,5	594,7	687,5	646,0	627,1	612,8
1,73	642,7	616,2	602,8	594,9	688,5	646,7	627,6	613,2
1,74	643,3	616,6	603,1	595,1	689,4	647,3	628,0	613,6
1,75	643,9	617,0	603,4	595,4	690,3	647,9	628,5	614,0
1,76	644,5	617,4	603,7	595,6	691,3	648,5	629,0	614,3
1,78	645,1	617,8	604,0	595,8	692,2	649,2	629,4	614,7
1,79	645,7	618,2	604,3	596,1	693,1	649,8	629,9	615,1
1,80	646,3	618,6	604,6	596,3	694,1	650,4	630,4	615,4
1,81	646,9	619,0	604,9	596,6	695,0	651,0	630,8	615,8
1,83	647,5	619,4	605,2	596,8	695,9	651,6	631,3	616,2
1,84	648,0	619,8	605,5	597,0	696,9	652,3	631,8	616,6
1,85	648,6	620,2	605,8	597,3	697,8	652,9	632,2	616,9
1,86	649,2	620,5	606,1	597,5	698,7	653,5	632,7	617,3
1,88	649,8	620,9	606,4	597,7	699,7	654,1	633,2	617,7
1,89	650,4	621,3	606,7	598,0	700,6	654,8	633,6	618,1
1,90	651,0	621,7	607,0	598,2	701,5	655,4	634,1	618,4
1,91	651,6	622,1	607,3	598,5	702,5	656,0	634,6	618,8
1,93	652,2	622,5	607,6	598,7	703,4	656,6	635,0	619,2
1,94	652,8	622,9	607,9	598,9	704,3	657,2	635,5	619,6
1,95	653,4	623,3	608,2	599,2	705,3	657,9	636,0	619,9
1,96	654,0	623,7	608,5	599,4	706,2	658,5	636,4	620,3
1,98	654,6	624,1	608,8	599,6	707,1	659,1	636,9	620,7
1,99	655,2	624,5	609,1	599,9	708,1	659,7	637,4	621,0

Anexo G

Propiedades termofísicas del fluido refrigerante

En la siguiente Tabla G.1 se muestran las propiedades termo físicas del agua, para distintas temperaturas y una presión de 16 MPa.

Tabla G.1. Propiedades termofísicas del fluido

Temperatura C	Densidad kg m ⁻³	Viscosidad Pa s	Capacidad Calorífica J kg ⁻¹ K ⁻¹	Conductividad Térmica W mK ⁻¹
0	1007,74	0,0017548	4145,82278	0,5698
20	1005,47	0,000995649	4138,24588	0,605763655
40	999,1214738	0,0065452	4141,288974	0,637872801
60	990,021278	0,000470052	4148,901534	0,661969695
80	978,7233659	0,000358552	4162,142751	0,678086492
100	965,6059756	0,000285995	4181,663222	0,687758625
120	950,8605083	0,00023618	4208,033911	0,692502388
140	934,4757382	0,000200507	4242,345019	0,693326886
160	916,4740236	0,000174047	4286,491738	0,690739804
180	896,7662325	0,000153802	4343,352148	0,634892789
200	875,3523184	0,000137858	4417,059746	0,675705127
220	852,0094772	0,000124941	4513,564978	0,662917624
240	826,4231513	0,000104868	4641,806976	0,646078017
260	797,9380824	0,000104868	4816,296913	0,624499953
280	765,6952855	9,65E-05	5063,575835	0,597269407
290	746,4111434	9,26E-05	5230,1189399	0,581234891
300	728,0752188	8,87E-5	5441,095697	0,563468135
320	681,8635529	8,07E-5	6106,27388	0,522626403
340	617,9850465	7,16E-5	7743,862671	0,474233798
347	586,0155898	6,73E-5	9346,102076	0,453943433

Anexo H

Datos calculados, presión del fluido para estructuras FCC y BCC a diferentes velocidades

En las siguientes Tablas se muestran los valores obtenidos mediante el modelo matemático, de la presión a lo largo del lecho fijo para distintos valores de velocidad, los cuales son:

1. $V1=0.4 \text{ m/s}$.
2. $V2=0.6 \text{ m/s}$.
3. $V3=0.8 \text{ m/s}$.
4. $V4=1 \text{ m/s}$.

Tabla H.1. Base de datos calculada perfil de presiones

	V1	V2	V3	V4	V1	V2	V3	V4
L [m]	Arreglo FCC [MPa]				Arreglo BCC [MPa]			
0,00	15,999	15,999	15,999	15,999	15,999	15,998	15,996	15,994
0,01	15,999	15,999	15,998	15,997	15,997	15,994	15,990	15,984
0,03	15,999	15,998	15,997	15,996	15,995	15,990	15,983	15,974
0,04	15,999	15,998	15,996	15,994	15,994	15,986	15,976	15,963
0,05	15,998	15,997	15,995	15,993	15,992	15,983	15,970	15,953
0,06	15,998	15,996	15,994	15,991	15,990	15,979	15,963	15,943
0,08	15,998	15,996	15,993	15,990	15,989	15,975	15,957	15,932
0,09	15,998	15,995	15,992	15,988	15,987	15,972	15,950	15,922
0,10	15,997	15,995	15,991	15,986	15,985	15,968	15,943	15,912
0,11	15,997	15,994	15,990	15,985	15,984	15,964	15,937	15,901
0,13	15,997	15,994	15,989	15,983	15,982	15,960	15,930	15,891
0,14	15,997	15,993	15,988	15,982	15,980	15,957	15,923	15,881
0,15	15,996	15,993	15,987	15,980	15,979	15,953	15,917	15,870
0,16	15,996	15,992	15,986	15,979	15,977	15,949	15,910	15,860
0,18	15,996	15,992	15,985	15,977	15,976	15,945	15,904	15,850
Continúa en la siguiente página								

L [m]	Arreglo FCC [MPa]				Arreglo BCC [MPa]			
0,19	15,996	15,991	15,984	15,976	15,974	15,942	15,897	15,839
0,20	15,995	15,990	15,983	15,974	15,972	15,938	15,890	15,829
0,21	15,995	15,990	15,982	15,973	15,971	15,934	15,884	15,819
0,23	15,995	15,989	15,981	15,971	15,969	15,931	15,877	15,808
0,24	15,995	15,989	15,980	15,970	15,967	15,927	15,871	15,798
0,25	15,994	15,988	15,979	15,968	15,966	15,923	15,864	15,788
0,26	15,994	15,988	15,978	15,967	15,964	15,919	15,857	15,777
0,28	15,994	15,987	15,977	15,965	15,962	15,916	15,851	15,767
0,29	15,994	15,987	15,976	15,964	15,961	15,912	15,844	15,757
0,30	15,993	15,986	15,975	15,962	15,959	15,908	15,837	15,746
0,31	15,993	15,985	15,975	15,960	15,957	15,905	15,831	15,736
0,33	15,993	15,985	15,974	15,959	15,956	15,901	15,824	15,726
0,34	15,993	15,984	15,973	15,957	15,954	15,897	15,818	15,715
0,35	15,993	15,984	15,972	15,956	15,952	15,893	15,811	15,705
0,36	15,992	15,983	15,971	15,954	15,951	15,890	15,804	15,695
0,38	15,992	15,983	15,970	15,953	15,949	15,886	15,798	15,684
0,39	15,992	15,982	15,969	15,951	15,947	15,882	15,791	15,674
0,40	15,992	15,982	15,968	15,950	15,946	15,878	15,785	15,664
0,41	15,991	15,981	15,967	15,948	15,944	15,875	15,778	15,653
0,43	15,991	15,980	15,966	15,947	15,942	15,871	15,771	15,643
0,44	15,991	15,980	15,965	15,945	15,941	15,867	15,765	15,633
0,45	15,991	15,979	15,964	15,944	15,939	15,864	15,758	15,622
0,46	15,990	15,979	15,963	15,942	15,937	15,860	15,751	15,612
0,48	15,990	15,978	15,962	15,941	15,936	15,856	15,745	15,602
0,49	15,990	15,978	15,961	15,939	15,934	15,852	15,738	15,591
0,50	15,990	15,977	15,960	15,938	15,933	15,849	15,732	15,581
0,51	15,989	15,977	15,959	15,936	15,931	15,845	15,725	15,571
0,53	15,989	15,976	15,958	15,934	15,929	15,841	15,718	15,560
0,54	15,989	15,976	15,957	15,933	15,928	15,837	15,712	15,550
0,55	15,989	15,975	15,956	15,931	15,926	15,834	15,705	15,540

Continúa en la siguiente página

L [m]	Arreglo FCC [MPa]				Arreglo BCC [MPa]			
0,56	15,988	15,974	15,955	15,930	15,924	15,830	15,699	15,529
0,58	15,988	15,974	15,954	15,928	15,923	15,826	15,692	15,519
0,59	15,988	15,973	15,953	15,927	15,921	15,823	15,685	15,509
0,60	15,988	15,973	15,952	15,925	15,919	15,819	15,679	15,498
0,61	15,987	15,972	15,951	15,924	15,918	15,815	15,672	15,488
0,63	15,987	15,972	15,950	15,922	15,916	15,811	15,665	15,478
0,64	15,987	15,971	15,949	15,921	15,914	15,808	15,659	15,467
0,65	15,987	15,971	15,948	15,919	15,913	15,804	15,652	15,457
0,66	15,986	15,970	15,947	15,918	15,911	15,800	15,646	15,447
0,68	15,986	15,969	15,946	15,916	15,909	15,797	15,639	15,436
0,69	15,986	15,969	15,945	15,915	15,908	15,793	15,632	15,426
0,70	15,986	15,968	15,944	15,913	15,906	15,789	15,626	15,416
0,71	15,985	15,968	15,943	15,911	15,904	15,785	15,619	15,405
0,73	15,985	15,967	15,942	15,910	15,903	15,782	15,613	15,395
0,74	15,985	15,967	15,941	15,908	15,901	15,778	15,606	15,385
0,75	15,985	15,966	15,940	15,907	15,899	15,774	15,599	15,374
0,76	15,984	15,966	15,939	15,905	15,898	15,770	15,593	15,364
0,78	15,984	15,965	15,938	15,904	15,896	15,767	15,586	15,354
0,79	15,984	15,965	15,937	15,902	15,894	15,763	15,580	15,343
0,80	15,984	15,964	15,936	15,901	15,893	15,759	15,573	15,333
0,81	15,983	15,963	15,935	15,899	15,891	15,756	15,566	15,323
0,83	15,983	15,963	15,934	15,898	15,890	15,752	15,560	15,312
0,84	15,983	15,962	15,933	15,896	15,888	15,748	15,553	15,302
0,85	15,983	15,962	15,932	15,895	15,886	15,744	15,546	15,292
0,86	15,982	15,961	15,931	15,893	15,885	15,741	15,540	15,281
0,88	15,982	15,961	15,930	15,892	15,883	15,737	15,533	15,271
0,89	15,982	15,960	15,929	15,890	15,881	15,733	15,527	15,261
0,90	15,982	15,960	15,928	15,889	15,880	15,729	15,520	15,250
0,91	15,981	15,959	15,927	15,887	15,878	15,726	15,513	15,240
0,93	15,981	15,958	15,927	15,885	15,876	15,722	15,507	15,230

Continúa en la siguiente página

L [m]	Arreglo FCC [MPa]				Arreglo BCC [MPa]			
0,94	15,981	15,958	15,926	15,884	15,875	15,718	15,500	15,219
0,95	15,981	15,957	15,925	15,882	15,873	15,715	15,494	15,209
0,96	15,981	15,957	15,924	15,881	15,871	15,711	15,487	15,199
0,98	15,980	15,956	15,923	15,879	15,870	15,707	15,480	15,188
0,99	15,980	15,956	15,922	15,878	15,868	15,703	15,474	15,178
1,00	15,980	15,955	15,921	15,876	15,866	15,700	15,467	15,168
1,01	15,980	15,955	15,920	15,875	15,865	15,696	15,460	15,157
1,03	15,979	15,954	15,919	15,873	15,863	15,692	15,454	15,147
1,04	15,979	15,953	15,918	15,872	15,861	15,689	15,447	15,137
1,05	15,979	15,953	15,917	15,870	15,860	15,685	15,441	15,126
1,06	15,979	15,952	15,916	15,869	15,858	15,681	15,434	15,116
1,08	15,978	15,952	15,915	15,867	15,856	15,677	15,427	15,106
1,09	15,978	15,951	15,914	15,866	15,855	15,674	15,421	15,095
1,10	15,978	15,951	15,913	15,864	15,853	15,670	15,414	15,085
1,11	15,978	15,950	15,912	15,862	15,851	15,666	15,408	15,075
1,13	15,977	15,950	15,911	15,861	15,850	15,662	15,401	15,064
1,14	15,977	15,949	15,910	15,859	15,848	15,659	15,394	15,054
1,15	15,977	15,949	15,909	15,858	15,847	15,655	15,388	15,044
1,16	15,977	15,948	15,908	15,856	15,845	15,651	15,381	15,033
1,18	15,976	15,947	15,907	15,855	15,843	15,648	15,374	15,023
1,19	15,976	15,947	15,906	15,853	15,842	15,644	15,368	15,013
1,20	15,976	15,946	15,905	15,852	15,840	15,640	15,361	15,002
1,21	15,976	15,946	15,904	15,850	15,838	15,636	15,355	14,992
1,23	15,975	15,945	15,903	15,849	15,837	15,633	15,348	14,982
1,24	15,975	15,945	15,902	15,847	15,835	15,629	15,341	14,971
1,25	15,975	15,944	15,901	15,846	15,833	15,625	15,335	14,961
1,26	15,975	15,944	15,900	15,844	15,832	15,621	15,328	14,951
1,28	15,974	15,943	15,899	15,843	15,830	15,618	15,322	14,940
1,29	15,974	15,942	15,898	15,841	15,828	15,614	15,315	14,930
1,30	15,974	15,942	15,897	15,840	15,827	15,610	15,308	14,920

Continúa en la siguiente página

L [m]	Arreglo FCC [MPa]				Arreglo BCC [MPa]			
1,31	15,974	15,941	15,896	15,838	15,825	15,607	15,302	14,909
1,33	15,973	15,941	15,895	15,836	15,823	15,603	15,295	14,899
1,34	15,973	15,940	15,894	15,835	15,822	15,599	15,288	14,889
1,35	15,973	15,940	15,893	15,833	15,820	15,595	15,282	14,878
1,36	15,973	15,939	15,892	15,832	15,818	15,592	15,275	14,868
1,38	15,972	15,939	15,891	15,830	15,817	15,588	15,269	14,858
1,39	15,972	15,938	15,890	15,829	15,815	15,584	15,262	14,847
1,40	15,972	15,938	15,889	15,827	15,813	15,581	15,255	14,837
1,41	15,972	15,937	15,888	15,826	15,812	15,577	15,249	14,827
1,43	15,971	15,936	15,887	15,824	15,810	15,573	15,242	14,816
1,44	15,971	15,936	15,886	15,823	15,808	15,569	15,236	14,806
1,45	15,971	15,935	15,885	15,821	15,807	15,566	15,229	14,796
1,46	15,971	15,935	15,884	15,820	15,805	15,562	15,222	14,785
1,48	15,970	15,934	15,883	15,818	15,804	15,558	15,216	14,775
1,49	15,970	15,934	15,882	15,817	15,802	15,554	15,209	14,765
1,50	15,970	15,933	15,881	15,815	15,800	15,551	15,202	14,754
1,51	15,970	15,933	15,880	15,813	15,799	15,547	15,196	14,744
1,53	15,969	15,932	15,879	15,812	15,797	15,543	15,189	14,734
1,54	15,969	15,931	15,879	15,810	15,795	15,540	15,183	14,723
1,55	15,969	15,931	15,878	15,809	15,794	15,536	15,176	14,713
1,56	15,969	15,930	15,877	15,807	15,792	15,532	15,169	14,703
1,58	15,969	15,930	15,876	15,806	15,790	15,528	15,163	14,692
1,59	15,968	15,929	15,875	15,804	15,789	15,525	15,156	14,682
1,60	15,968	15,929	15,874	15,803	15,787	15,521	15,150	14,672
1,61	15,968	15,928	15,873	15,801	15,785	15,517	15,143	14,661
1,63	15,968	15,928	15,872	15,800	15,784	15,513	15,136	14,651
1,64	15,967	15,927	15,871	15,798	15,782	15,510	15,130	14,641
1,65	15,967	15,926	15,870	15,797	15,780	15,506	15,123	14,630
1,66	15,967	15,926	15,869	15,795	15,779	15,502	15,117	14,620
1,68	15,967	15,925	15,868	15,794	15,777	15,499	15,110	14,610

Continúa en la siguiente página

L [m]	Arreglo FCC [MPa]				Arreglo BCC [MPa]			
1,69	15,966	15,925	15,867	15,792	15,775	15,495	15,103	14,599
1,70	15,966	15,924	15,866	15,791	15,774	15,491	15,097	14,589
1,71	15,966	15,924	15,865	15,789	15,772	15,487	15,090	14,579
1,73	15,966	15,923	15,864	15,787	15,770	15,484	15,083	14,568
1,74	15,965	15,923	15,863	15,786	15,769	15,480	15,077	14,558
1,75	15,965	15,922	15,862	15,784	15,767	15,476	15,070	14,548
1,76	15,965	15,922	15,861	15,783	15,766	15,473	15,064	14,537
1,78	15,965	15,921	15,860	15,781	15,764	15,469	15,057	14,527
1,79	15,964	15,920	15,859	15,780	15,762	15,465	15,050	14,517
1,80	15,964	15,920	15,858	15,778	15,761	15,461	15,044	14,506
1,81	15,964	15,919	15,857	15,777	15,759	15,458	15,037	14,496
1,83	15,964	15,919	15,856	15,775	15,757	15,454	15,031	14,486
1,84	15,963	15,918	15,855	15,774	15,756	15,450	15,024	14,475
1,85	15,963	15,918	15,854	15,772	15,754	15,446	15,017	14,465
1,86	15,963	15,917	15,853	15,771	15,752	15,443	15,011	14,455
1,88	15,963	15,917	15,852	15,769	15,751	15,439	15,004	14,444
1,89	15,962	15,916	15,851	15,768	15,749	15,435	14,997	14,434
1,90	15,962	15,915	15,850	15,766	15,747	15,432	14,991	14,424
1,91	15,962	15,915	15,849	15,765	15,746	15,428	14,984	14,413
1,93	15,962	15,914	15,848	15,763	15,744	15,424	14,978	14,403
1,94	15,961	15,914	15,847	15,761	15,742	15,420	14,971	14,393
1,95	15,961	15,913	15,846	15,760	15,741	15,417	14,964	14,382
1,96	15,961	15,913	15,845	15,758	15,739	15,413	14,958	14,372
1,98	15,961	15,912	15,844	15,757	15,737	15,409	14,951	14,362
1,99	15,960	15,912	15,843	15,755	15,736	15,405	14,945	14,351